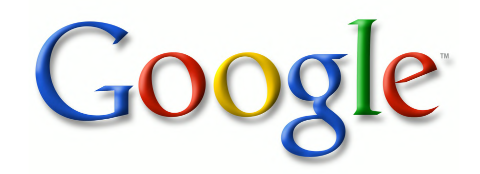

Google


B 465679



1837
ARTES
SCIENTIA
VERITAS
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
E PLURIBUS UNUM
TUEBOR
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE
DEPARTMENT
OF
ENGINEERING



7957 –

PRINCIPES

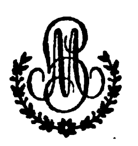
D'ÉLECTROTECHNIE

PAR

Émile PIERARD

INGÉNIEUR HONORAIRE DES MINES, INGÉNIEUR DES TÉLÉGRAPHES
SORTI DE L'INSTITUT ÉLECTRO-TECHNIQUE MONTEFIORE,
PROFESSEUR D'ÉLECTRICITÉ INDUSTRIELLE A L'UNIVERSITÉ LIBRE DE BRUXELLES

PRIX : 10 FR.



RAMLOT
17, rue Grétry, 17
Bruxelles

DUNOD
Quai des Grands-Augustins
Paris

1902

HAYEZ, IMPRIMEUR DE L'ACADÉMIE, BRUXELLES

PRINCIPES

D'ÉLECTROTECHNIE

PRINCIPES

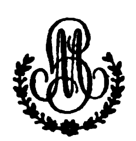
D'ÉLECTROTECHNIE

PAR

Émile PIERARD

INGÉNIEUR HONORAIRE DES MINES, INGÉNIEUR DES TÉLÉGRAPHES
SORTI DE L'INSTITUT ÉLECTRO-TECHNIQUE MONTEFIORE,
PROFESSEUR D'ÉLECTRICITÉ INDUSTRIELLE A L'UNIVERSITÉ LIBRE DE BRUXELLES

PRIX : 10 FR.



RAMLOT
17, rue Grétry, 17
Bruxelles

DUNOD
Quai des Grands-Augustins
Paris

1902

HAYEZ, IMPRIMEUR DE L'ACADÉMIE, BRUXELLES

A MONSIEUR ÉRIC GERARD

Directeur

de l'Institut électro-technique Montefiore

ÉMILE PIERARD.

DU MÊME AUTEUR :

LA TÉLÉPHONIE, ouvrage couronné par l'Association des ingénieurs sortis des Écoles spéciales de Liége. Deuxième édition in-8° de 491 pages; 318 figures dans le texte. Prix : 10 francs. En vente chez :

DUNOD, quai des Grands-Augustins, 49, Paris;
RAMLOT, rue Grétry, 17, Bruxelles;
DESOER, rue Gérardrie, 4, Liége.

LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL A TRAVERS LES AGES, brochure raisin de 51 pages avec 24 figures dans le texte. Prix : 1,50 fr. En vente chez :

DUNOD, quai des Grands-Augustins, 49, Paris;
RAMLOT, rue Grétry, 17, Bruxelles.

PRÉFACE

Le cours que nous publions est celui professé à l'Université libre de Bruxelles.

Il s'adresse aux élèves-ingénieurs de dernière année possédant des connaissances générales d'électricité, et a pour but de leur faire connaître d'une manière déjà approfondie l'anatomie et le fonctionnement des divers genres de machines électriques ; de leur permettre de comprendre le mécanisme et de réaliser des installations électriques courantes ; de leur donner des notions nettes sur la propagation des courants, notamment des courants alternatifs et polyphasés si utilisés aujourd'hui.

C'est aussi une préparation (car l'électrotechnie ne s'assimile pas du premier jet) à l'étude des grands traités d'électricité au premier rang desquels nous plaçons celui de notre ancien maître M. Éric Gerard, dont nous nous sommes inspiré en bien des endroits du présent livre. Nous devons également une mention spéciale aux beaux ouvrages de MM. Dacremont et Janet.

Le nombre restreint de nos leçons nous a forcé d'être bref; de nous attacher beaucoup plus à exposer aussi clairement que possible des principes; d'éviter les longues discussions mathématiques, sans toutefois sacrifier la rigueur du raisonnement; de schématiser machines et installations, plutôt que de décrire minutieusement et en quelque sorte photographier l'état actuel, d'ailleurs changeant, de l'industrie électrotechnique.

Et c'est pour le même motif, que nous avons réduit les applications industrielles proprement dites à quelques données sur celles présentant un caractère d'incontestable généralité : tramways, éclairage, télégraphie, téléphonie.

É. P.

PRINCIPES

D'ÉLECTROTECHNIE

CHAPITRE Ier

RAPPEL DE NOTIONS FONDAMENTALES

§ 1. — LOIS D'OHM, DE JOULE, DE KIRCHHOFF. COUPLAGE DES CONDENSATEURS.

Loi d'Ohm. — Soit un conducteur de résistance R parcouru par un courant d'intensité constante I. Si U est la différence de potentiel entre deux points de ce conducteur, aucun générateur ni récepteur n'existant entre eux, on a :

$$U = RI,$$

c'est-à-dire que : *La chute de potentiel entre deux points d'un circuit, entre lesquels ne se trouve aucun générateur ni récepteur, est égale au produit de l'intensité du courant par la résistance qui les sépare.*

Si, par exemple, un conducteur de forme quelconque, dont la résistance est de 7,8 ohms, est parcouru par un courant de 2 ampères, un voltmètre inséré entre ses deux extrémités indiquera la différence de potentiel $7{,}8 \times 2 = 15{,}6$ volts.

Réciproquement, si l'on applique 15,6 volts à ses extrémités, il sera parcouru par un courant de 2A.

Enfin, si l'on nous dit qu'un courant de 2A passe dans le conducteur quand la pression à ses extrémités est de 15,6 volts,

nous tirons immédiatement de l'expression ci-dessus que la résistance de ce conducteur doit être :

$$R = \frac{U}{I} = \frac{15,6}{2} = 7,8 \text{ ohms.}$$

REMARQUE I. — Les potentiels vont naturellement en décroissant dans le sens du courant.

REMARQUE II. — Le passage d'un courant I dans une résistance R donne donc lieu à une chute de voltage RI dans le sens de la marche du courant. En d'autres termes, dans un conducteur traversé par un courant, le potentiel au point de sortie du courant est égal au potentiel au point d'entrée diminué de la chute RI.

Cas d'un circuit quelconque. — Soit une partie de circuit, constituée par des conducteurs quelconques (solides ou liquides), mais différents : AB, BC, CD, etc. (fig. 1).

On suppose que, d'une manière générale, il existe aux points de contact des forces électromotrices donnant lieu à des différences de potentiel E_1, E_2, etc. Ces forces E_1, E_2, ..., sont prises positivement, si elles sont dirigées dans le sens du courant indiqué par la flèche et négativement dans le cas contraire, ceci par convention.

FIG. 1.

Soient R_1, R_2, R_3, ..., les résistances de ces conducteurs; V_A et V_D les potentiels aux points A et D. On peut calculer le potentiel au point D :

$$V_D = V_A - R_1I + E_1 - R_2I + E_2 - R_3I,$$

d'où

$$V_D - V_A = \Sigma E - I\Sigma R.$$

Telle est l'expression générale de la loi d'Ohm, qui peut se formuler ainsi : *Étant donnée une partie de circuit quelconque où se trouvent des forces électromotrices ou contre-électro-*

motrices, la différence de potentiel entre deux points du circuit est égale à la somme algébrique des forces électromotrices diminuée du produit de l'intensité du courant par la résistance totale du circuit.

En particulier, s'il n'existe aucune force électromotrice dans le circuit, $\Sigma E = O$, et l'on a simplement

$$V_A - V_D = I\Sigma R \quad \text{et} \quad U = I\Sigma R,$$

ce qui est bien la loi d'Ohm dans le cas examiné en premier lieu.

Loi de Joule. — De la loi d'Ohm, on déduit la loi de Joule

$$UI = RI^2,$$

en multipliant les deux membres par l'intensité du courant.

La puissance disponible entre deux points d'un circuit est UI, et s'il n'y a pas de récepteur entre ces deux points, cette puissance se transforme entièrement en chaleur. On peut énoncer cette loi : *La puissance qui apparaît entre deux points d'un circuit sous forme de chaleur est égale au produit de la résistance entre ces deux points par le carré de l'intensité.*

On peut encore écrire, en remplaçant I par sa valeur,

$$UI = \frac{U^2}{R},$$

et dire : *La puissance qui apparaît entre deux points d'un circuit sous forme de chaleur est égale au quotient du carré de la différence de potentiel entre ces deux points par la résistance du circuit entre les mêmes limites.*

L'expression de cette chaleur en calories (gramme-degré) est

$$RI^2 \cdot 0{,}24 \text{ calories}, \qquad \text{car } 1 \text{ joule} = 0{,}24 \text{ c.}$$

Si, par exemple, il passe 6A dans un conducteur de 2O de résistance, la chaleur développée dans le conducteur est

$2 . 36 . 0,24 = 17,5$ petites calories ou 0,0175 grandes (kg-degré) par seconde.

Court-circuit. — Il résulte de la loi d'Ohm que, si deux points offrant une différence de potentiel entretenue par un générateur sont mis en connexion par un conducteur de résistance pratiquement nulle, l'intensité du courant traversant ce conducteur tendra vers l'infini. On dit alors que les deux points sont mis en court-circuit. L'échauffement du conducteur donné par la loi de Joule $\frac{U^2}{R}$ croîtra indéfiniment au point d'amener sa fusion ou sa volatilisation. Les courts-circuits de ce genre offrent donc un danger sérieux et sont particulièrement à redouter dans les installations électriques. Nous étudierons les moyens d'éviter leurs effets nocifs.

Lois de Kirchhoff. — Soit un réseau quelconque de conducteurs, ce réseau pouvant comprendre des générateurs et des récepteurs. Les lois de Kirchhoff permettent de calculer l'intensité dans chaque branche.

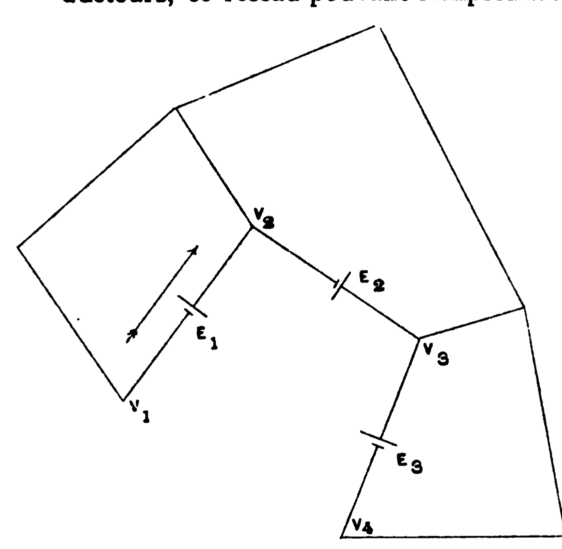


Fig. 2.

Première loi. — *La somme des intensités de tous les courants qui arrivent à un sommet est égale à la somme de tous les courants qui s'en éloignent.*

En considérant les unes comme positives, les autres comme négatives, on peut dire que la somme algébrique des intensités des courants qui se croisent en un point est nulle. C'est évident.

SECONDE LOI. — *Si, sur le réseau, on considère un circuit fermé quelconque et que ce circuit soit composé des branches de résistances différentes* R_1, R_2, ..., *où circulent des courants d'intensité* I_1, I_2, ..., *avec des forces électromotrices* E_1, E_2, ... (fig. 2), *la somme algébrique de toutes les forces électromotrices qui existent dans le circuit fermé considéré, est égale à la somme des produits de l'intensité de chaque courant par la résistance qu'il traverse.*

On considère successivement chaque branche, en parcourant le contour fermé et revenant au point de départ.

On se donne, comme précédemment, un sens positif pour la direction des courants. Les forces électromotrices tendant à engendrer un courant de ce sens seront considérées comme positives; les autres, de même aussi que les courants de sens contraires, seront négatifs.

En appliquant la loi générale d'Ohm au cas où dans le circuit considéré se trouve une force électromotrice et en tenant compte des signes, on aura :

$$V_2 - V_1 = E_1 - I_1R_1$$
$$V_3 - V_2 = E_2 - I_2R_2$$
$$. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad .$$
$$V_1 - V_n = E_n - I_nR_n.$$

En additionnant, il vient :

$$\Sigma E = \Sigma IR.$$

Les lois de Kirchhoff sont d'une importance capitale. Ce sont elles qui permettent de déterminer les facteurs des circuits les plus compliqués.

Elles s'appliquent aussi à la période variable du courant pour toutes ses valeurs instantanées. Par exemple, si un circuit de résistance totale r, dans lequel existe une force électromotrice variable e, présente une *selfinductance* $\mathcal{L}$ donnant, comme on sait, lieu à une force contre-électromotrice $-\mathcal{L}\frac{di}{dt}$,

à l'instant t_1 pour lequel la force électromotrice est e_1 et l'intensité du courant i_1, on a :

$$e_1 - \mathcal{L}\frac{di_1}{dt} = ri_1.$$

Lois des courants dérivés. Résistance combinée. — *Lorsqu'un conducteur se bifurque en plusieurs autres, le courant se subdivise entre eux d'une manière inversement proportionnelle à leur résistance.*

Soit un conducteur multiple parcouru par un courant I (fig. 3) dont les points de subdivision sont aux potentiels respectifs V_1 et V_2 et $r_1, r_2, \ldots$, les résistances des branchements parcourus par les courants i_1, i_2, ...

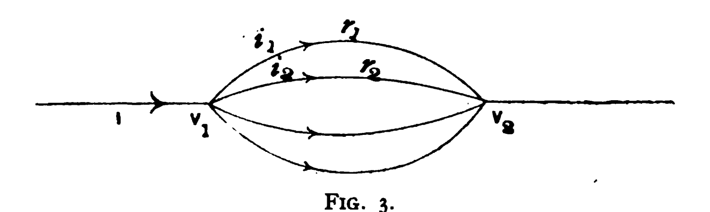


FIG. 3.

Appelons X la résistance combinée de l'ensemble des conducteurs r_1, r_2, ..., c'est-à-dire une résistance telle qu'en appliquant à ses bornes la différence de potentiel $V_1 - V_2$, elle soit parcourue par le courant total I.

L'application de la loi d'Ohm au faisceau de conducteurs considérés en bloc donne par définition :

$$I = \frac{V_1 - V_2}{X}.$$

En l'appliquant à chacun des conducteurs pris isolément, on a :

$$i_1 = \frac{V_1 - V_2}{r_1}; \quad i_2 = \frac{V_1 - V_2}{r_2}; \quad i_3 = \frac{V_1 - V_2}{r_3}; \quad \ldots$$

On tire immédiatement de ces équations :

$$i_1 r_1 = i_2 r_2 = \dots = \mathrm{I}X,$$

d'où

$$\frac{i_1}{\mathrm{I}} = \frac{X}{r_1}; \quad \frac{i_2}{\mathrm{I}} = \frac{X}{r_2}; \quad \text{etc.,} \qquad (1)$$

ce qui justifie la proposition énoncée et nous permettra de calculer les divers courants i_1, i_2, ..., dès que nous connaîtrons les résistances partielles r_1, r_2, ..., la résistance combinée X et le courant total I.

Cherchons maintenant la valeur X de la résistance combinée en fonction des résistances composantes.

La première loi de Kirchhoff nous donne

$$\mathrm{I} = i_1 + i_2 + i_3 + \cdots,$$

ou, en remplaçant I, i_1, i_2, ... par les valeurs précédemment trouvées :

$$\frac{V_1 - V_2}{X} = \frac{V_1 - V_2}{r_1} + \frac{V_1 - V_2}{r_2} + \cdots,$$

ou

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \cdots,$$

ou enfin

$$X = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \cdots} = \frac{1}{\sum \frac{1}{r}},$$

ce qui s'énonce : *La résistance combinée est égale à l'inverse de la somme des inverses des résistances composantes.*

Remarque. — Nous serions arrivés directement aux équations $i_1 r_1 = i_2 r_2 = \cdots$, en appliquant aux circuits formés par

les résistances $r_1 r_2$; $r_2 r_3$, ..., la seconde loi de Kirchhoff. En l'appliquant au circuit $r_1 r_2$, par exemple, on a :

$$o = i_1 r_1 - i_2 r_2 \quad \text{ou} \quad i_1 r_1 = i_2 r_2,$$

et ainsi de suite.

Application. — Trois résistances dérivées ayant respectivement 3, 5 et 7 ohms ont une résistance combinée de 1,48 O. Les courants qui les traversent ont respectivement pour valeur 0,494, 0,296 et 0,21 I (*).

Cas de deux conducteurs. — Arrêtons-nous un instant au cas fréquent où la dérivation est constituée par deux conducteurs de résistance r_1, r_2. Leur résistance combinée

$$X = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}} = \frac{r_1 \, r_2}{r_1 + r_2},$$

formule aisée à retenir.

Le courant dans chacune des branches sera d'ailleurs, en vertu des formules (1) :

$$i_1 = \frac{I r_2}{r_1 + r_2}; \quad i_2 = \frac{I r_1}{r_1 + r_2}.$$

Pont de Wheastone. — Puisque le potentiel décroît régulièrement dans les conducteurs dérivés de la valeur V_1 à V_2, nous y rencontrerons des séries de potentiels égaux. Cherchons la condition à remplir pour arriver au point de même potentiel dans le cas de deux conducteurs, par exemple.

Soit a une résistance prise dans le conducteur r_1 à partir de V_1. La chute de potentiel depuis V_1 sera

$$a i_1 = \frac{a I r_2}{r_1 + r_2}.$$

(*) Les calculs, ainsi que dans la suite, sont effectués à la règle de 26 centimètres.

Le point de même potentiel sur le second conducteur sera évidemment obtenu quand la chute de potentiel y sera égale à ai_1. Or nous savons qu'elle vaut

$$ci_2 = \frac{cIr_1}{r_1 + r_2}$$

en appelant c la résistance mesurée sur le second conducteur depuis V_1. Il faut donc que

$$\frac{aIr_2}{r_1 + r_2} = \frac{cIr_1}{r_1 + r_2} \quad \text{ou} \quad ar_2 = cr_1.$$

ou encore

$$\frac{a}{c} = \frac{r_1}{r_2}.$$

D'autre part, puisque l'on revient au point de même potentiel V_2, les chutes dans le restant des deux conducteurs r_1, r_2 sont aussi égales, ce qui donne, en appelant b et d les deux résistances $r_1 - a$ et $r_2 - c$:

$$br_2 = dr_1 \quad \text{ou} \quad \frac{b}{d} = \frac{r_1}{r_2}.$$

L'équation générale à remplir sera donc

$$\frac{a}{c} = \frac{b}{d} \quad \text{ou} \quad \frac{a}{b} = \frac{c}{d} \qquad (2).$$

C'est le principe du pont de Wheastone (fig. 4). L'égalité de potentiel est obtenue quand un galvanomètre inséré *en pont* entre les deux conducteurs dérivés reste au zéro.

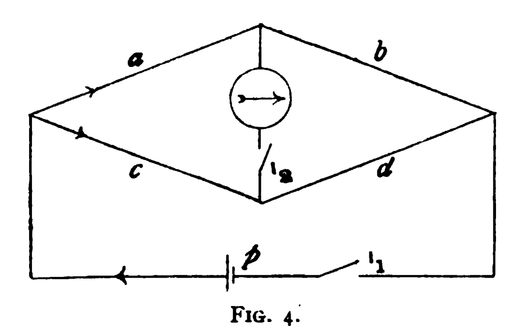


FIG. 4.

En pratique, les résistances a, b sont débouchées de manière à obtenir un certain rapport 1, 10, 100, 1 000, 10 000 ou $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{100}$, ... ;

c est la résistance de *comparaison* que l'on fait varier jusqu'à obtenir le zéro du galvanomètre; la résistance inconnue est

$$d = c \cdot \frac{b}{a} \cdot$$

La différence de potentiel nécessaire est obtenue en raccordant les points V_1 et V_2 à une pile. I sont des interrupteurs destinés à empêcher le fonctionnement continu de la pile et du galvanomètre. On abaisse d'abord I_1, puis I_2.

REMARQUE. — La formule (2) serait également obtenue par l'application des lois de Kirchhoff aux divers circuits formés par les conducteurs *a*, *b*, *c*, *d*, le galvanomètre et la pile. On calculerait l'intensité du courant passant dans le galvanomètre. La condition pour obtenir sa nullité serait $ad - bc = 0$, c'est-à-dire précisément (2).

COROLLAIRES DE BOSSCHA. — I. Lorsque l'équation (2) est satisfaite, il ne passe plus aucun courant dans le galvanomètre et sa résistance ne peut conséquemment plus intervenir dans le calcul de l'intensité du courant traversant les autres branches. Donc, *quand dans un système de circuits fermés l'intensité est nulle dans une des branches, les intensités dans les autres branches sont indépendantes de la résistance de cette branche.*

II. Dans les mêmes conditions, rien n'est changé dans nos équations si, au lieu d'un élément de pile *p*, nous en insérons 2, 3, ... Donc, *lorsque deux branches* A *et* B *d'un réseau de conducteurs sont telles qu'une force électromotrice placée dans la branche* A *n'envoie aucun courant dans la branche* B, *on peut faire varier le courant dans* A *de* o *à l'infini, sans troubler le régime dans la branche* B.

Couplage des condensateurs. — Les condensateurs peuvent être couplés en quantité ou en série.

Dans le GROUPEMENT EN QUANTITÉ, dit aussi EN SURFACE,

toutes les armatures sont réunies de part et d'autre (fig. 5).

c_1, c_2, ..., étant les capacités des divers condensateurs, U la différence de potentiel appliquée, $q_1, q_2, \ldots$, les quantités d'électricité qui les chargent, C et Q leurs capacité et charge totales, on a évidemment

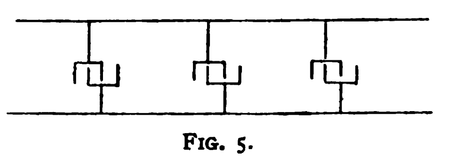


Fig. 5.

$$Q = q_1 + q_2 + \cdots$$

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{q_1}{U} + \frac{q_3}{U} + \cdots = c_1 + c_2 + c_3 + \cdots$$

La capacité résultante de condensateurs groupés en quantité est égale à la somme de leurs capacités.

Exemple. — Quatre condensateurs de capacités respectives de 7, 4, 2 et 9 microfarads, disposés en quantité, correspondent à un seul condensateur ou exercent le même effet d'emmagasinement qu'un seul appareil de $7 + 4 + 2 + 9 = 22$ microfarads.

Groupement en série ou cascade. — Ici la liaison se fait de la seconde armature du premier à la première armature du second, de la seconde armature de ce dernier à la première du troisième et ainsi de suite. Supposons qu'une différence de potentiel $V_1 - V_n$ soit appliquée aux armatures extrêmes (fig. 6).

On aura, les quantités d'électricité qui chargent tous les condensateurs étant évidemment égales, puisque c'est le même flux qui les a traversés tous lorsqu'on a appliqué aux extrémités de la série la différence de potentiel $V_1 - V_n$:

$$Q = c_1(V_1 - V_2)$$

$$Q = c_2(V_2 - V_3)$$

. . . .

. . . .

Fig. 6.

d'où

$$\frac{Q}{c_1} = V_1 - V_2, \quad \frac{Q}{c_2} = V_2 - V_3, \quad \ldots$$

et, en additionnant :

$$\frac{Q}{c_1} + \frac{Q}{c_2} + \cdots = V_1 - V_n.$$

En appelant C_x la capacité combinée de la cascade :

$$\frac{Q}{C_x} = V_1 - V_n,$$

donc

$$\frac{Q}{c_1} + \frac{Q}{c_2} + \cdots = \frac{Q}{C_x} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{C_x} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \cdots$$

et

$$C_x = \frac{1}{\sum \frac{1}{c}},$$

formule analogue à celle trouvée plus haut pour la résistance combinée d'un faisceau de conducteurs. On peut l'énoncer : *La capacité combinée de condensateurs groupés en série est égale à l'inverse de la somme des inverses des capacités des condensateurs constituants.*

Exemple. — Les mêmes condensateurs que précédemment, groupés en série, ont une capacité de 0,964 microfarad.

En résumé, quand on dispose d'un certain nombre de condensateurs, on obtiendra une capacité maximum en les groupant tous en dérivation et une capacité minimum en les groupant en série.

Entre ces deux groupements limites viennent s'intercaler toutes les combinaisons que l'on peut faire en embrochant en série des groupes d'éléments mis en dérivation.

Il convient, bien entendu, que chaque série de condensateurs possède le même nombre d'appareils.

§ 2. — ÉLECTROMAGNÉTISME.

Règle d'Ampère. — Un courant exerce une certaine action sur l'aiguille aimantée. Suivant la règle pratique établie par Ampère, le pôle nord de l'aiguille tend à s'orienter vers la gauche d'un observateur regardant l'aiguille et couché suivant le courant, de manière que celui-ci lui entre par les pieds.

L'expérience montre donc que le courant produit un champ magnétique, ce que l'on met d'ailleurs en évidence au moyen de limaille de fer par la méthode des fantômes.

En saupoudrant de limaille de fer une feuille de papier traversée par un courant perpendiculaire au plan de la feuille, on remarque que les grains forment des circonférences (fig. 7) dont le centre est sur l'axe du conducteur. Un pôle magnétique libre de se mouvoir dans le voisinage du courant tendrait par conséquent à tourner autour de celui-ci. Maxwell a donné un autre moyen de déterminer ce sens.

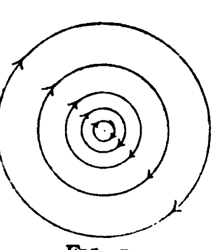


FIG. 7.

Règle de Maxwell. — Le sens de la rotation du pôle nord et le sens du courant sont indiqués par les mouvements relatifs de rotation et de translation d'un tire-bouchon.

Action d'un champ magnétique sur un élément de courant. — RÈGLE D'AMPÈRE. — Un champ magnétique exerce une action sur un élément de courant, ce qui se conçoit aisément, si l'on considère que le conducteur lui-même développe un champ magnétique. On a affaire à deux champs

magnétiques réagissant l'un sur l'autre. Cette force, appliquée à l'élément de courant, est ***normale au plan du courant et du champ et dirigée vers la gauche de l'observateur d'Ampère quand il regarde dans le sens des lignes de force du champ.***

Règle des trois doigts. — M. Fleming a donné une règle d'application assez simple pour déterminer le sens du mouvement d'un conducteur traversé par un courant et plongé dans un champ magnétique. Plaçons à angles droits le pouce, l'index et le médius de la main gauche : l'index dans le sens des lignes de force du champ (induction) ; le médius suivant la direction du courant ; le pouce donnera alors la direction suivant laquelle le conducteur est sollicité (*poussé*).

Énergie d'un courant dans un champ magnétique. — Règle de Maxwell. — Un circuit mobile dans un champ magnétique et traversé par un courant est sollicité à se déplacer de manière à embrasser le plus grand flux possible par sa face négative. La face négative est celle de la figure formée par le courant par laquelle entrent les lignes de force dues au courant lui-même.

Ainsi, un conducteur circulaire, mobile autour d'un de ses diamètres supposé perpendiculaire à la direction du champ terrestre, tourne de manière à orienter sa face positive vers le nord. Les lignes de force pénètrent alors normalement par sa face négative.

Règle de Faraday. — *Le travail accompli par un conducteur qui se déplace dans un champ est égal au produit de l'intensité du courant par le flux de force ou nombre de lignes de force coupées par le conducteur.*

Champ magnétique créé par un courant. — Un courant traversant un conducteur cylindrique rectiligne développe autour de lui un champ magnétique. Ce champ sera circulaire, peu intense, et d'autant moins intense, que l'on s'écartera davantage de l'axe.

Solénoïde. — Force magnétisante. — Si l'on enroule le conducteur suivant un solénoïde (fig. 8), on comprend aisément que l'action d'une spire concordera avec celle de la suivante et qu'à l'intérieur du solénoïde, on obtiendra un champ magnétique sensiblement uniforme, sauf vers les extrémités, où les lignes de force divergeront en s'épanouissant dans le milieu ambiant.

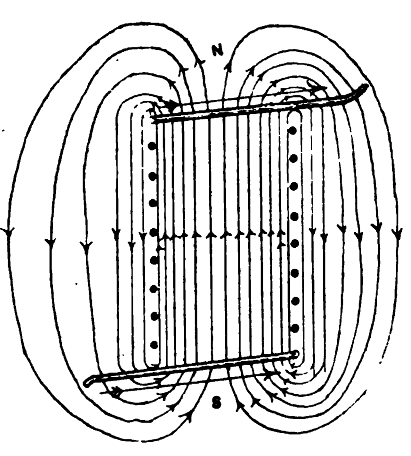


Fig. 8.

En considérant un solénoïde suffisamment long, le champ créé dans sa partie médiane par unité de surface de section droite aura pour valeur $\mathcal{H} = 4\pi n_1 i$, en appelant i l'intensité du courant traversant le conducteur et n_1 le nombre de spires par unité de longueur suivant l'axe. La quantité $\mathcal{H}$ est appelée *force magnétisante* du solénoïde. En désignant par s la section droite de l'appareil, le flux qui la traverse est $\mathcal{H}s$.

Électro-aimant. — Perméabilité magnétique. — Le courant passant toujours, introduisons dans le solénoïde une substance magnétique. Nous aurons ainsi formé un électro-aimant et nous constaterons un grand renforcement du flux par unité de surface ou *induction*. $\mathcal{H}$ a pris une valeur $\mathcal{B} > \mathcal{H}$ et le rapport

$$\frac{\mathcal{B}}{\mathcal{H}} = \mu,$$

appelé *perméabilité magnétique*, caractérise la substance essayée. On tire de cette équation

$$\mathcal{B} = \mu\mathcal{H} = 4\pi n_1 i\mu.$$

Courbe du magnétisme. — SATURATION MAGNÉTIQUE. — Faisons prendre au courant des valeurs croissantes depuis O. La force magnétisante augmentera indéfiniment, mais il n'en sera pas de même de l'induction. En particulier, si nous considérons un noyau de fer doux, qui n'a jamais été aimanté, et portons en abscisses les valeurs de la force magnétisante, en ordonnées celles de l'induction, nous obtiendrons la courbe (fig. 9) appelée *courbe du magnétisme.*

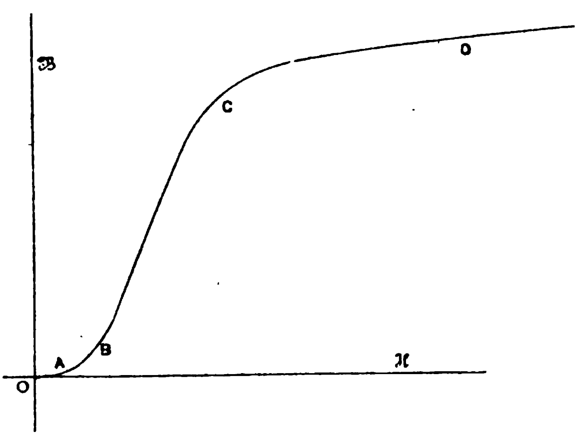


FIG. 9.

Tout d'abord, l'induction croît fort lentement, partie OA; puis très vite, déterminant une partie sensiblement droite BC; elle croît ensuite plus lentement en formant un coude prononcé; enfin, l'induction n'augmente plus que très lentement : le noyau est *saturé.*

La perméabilité, rapport des ordonnées de la courbe ci-dessus à leurs abscisses, est donc en général variable.

REMARQUE. — Par définition, la perméabilité de l'air est égale à l'unité.

Voici un tableau donnant des valeurs moyennes de μ et de $\mathfrak{B}$ en fonction de $\mathcal{H}$ pour des matériaux de provenance anglaise :

FER FORGÉ RECUIT			FONTE GRISE		
$\mathcal{H}$	$\mathfrak{B}$	μ	$\mathcal{H}$	$\mathfrak{B}$	μ
2	5 000	2 500	5	4 000	800
4	9 000	2 250	10	5 000	500
5	10 000	2 000	21,5	6 000	279
6,5	11 000	1 692	42	7 000	166
8,5	12 000	1 412	80	8 000	100
12	13 000	1 083	127	9 000	71
17	14 000	823	188	10 000	53
28,5	15 000	526	292	11 000	37
52	16 000	308			
105	17 000	161			
200	18 000	90			
350	19 000	54			

Circuit magnétique. Force magnétomotrice. Réluctance. — L'effet magnétique du courant est donc de faire passer à travers l'espace qui l'environne un flux de force, faisceau de lignes fermées, que le milieu soit homogène ou hétérogène. Si le courant parcourt un solénoïde enroulé autour d'un tore fermé, les lignes de force sont confinées à l'intérieur de ce tore.

Le chemin suivi par les lignes de force s'appelle *circuit magnétique.*

Soit un circuit homogène constitué par un anneau en matériaux magnétiques, enveloppé d'un solénoïde traversé par un courant.

L'induction magnétique étant

$$\mathfrak{B} = \mu\mathcal{H},$$

le flux total à travers la section s du noyau est :

$$\mathcal{N} = \mathcal{B}s = 4\pi n_1 i \mu s.$$

En appelant l la longueur de l'axe circulaire de l'anneau, n le nombre total de spires de la bobine

$$n_1 = \frac{n}{l}, \quad \text{d'où} \quad \mathcal{N} = \frac{4\pi ni}{\frac{l}{\mu s}},$$

relation analogue à la loi d'Ohm.

Cette formule est établie en unités CGS. Si i est exprimé en unités pratiques, en ampères, l'ampère étant égal au $\frac{1}{10}$ de l'unité CGS, on aura

$$\mathcal{N} = \frac{4\pi ni \,.\, 10^{-1}}{\frac{l}{\mu s}}.$$

Le flux magnétique est proportionnel à l'expression $4\pi ni$, qu'on appelle par similitude *force magnétomotrice,* et inversement proportionnel à $\frac{l}{\mu s}$, qui reçoit le nom de *résistance magnétique* du circuit ou *réluctance; ni* est le nombre d'ampères-tours. La formule peut s'énoncer : *Le flux de force produit dans un circuit magnétique est égal à la force magnétomotrice divisée par la réluctance.*

Application. — Cherchons le nombre d'ampères-tours à enrouler sur un noyau annulaire en fer doux d'une longueur de 0m14 suivant l'axe, d'une section de 2 centimètres carrés, pour y faire passer un flux de 30 000 maxwells, soit le soumettre à une induction de 15 000 gauss.

Nous trouvons dans le tableau de la page 17, qu'à l'induction de 15 000 correspond pour le fer doux une perméabilité de 526. Donc, $\mu = 526$, $l = 14$, $s = 2$, $\mathcal{N} = 30\,000$. En remplaçant les lettres par leur valeur dans la dernière formule, il vient :

$$30\,000 = \frac{4\pi ni \,.\, 10^{-1}}{\frac{14}{526 \,.\, 2}}, \quad \text{d'où} \quad ni = 318 \text{ ampères-tours},$$

ce que l'on pourra réaliser, par exemple, au moyen de 100 spires traversées par un courant de 3,18 A.

L'inverse de la perméabilité $\frac{1}{\mu}$ s'appelle la réluctivité.

Si le noyau est composé de divers tronçons ayant des longueurs l, l', l'', des sections s, s', s'' et des perméabilités μ, μ', μ'', on aura

$$\mathfrak{N} = \frac{4\mu n i}{\frac{l}{\mu s} + \frac{l'}{\mu' s'} + \frac{l''}{\mu'' s''}}.$$

Magnétisme rémanent. Force coercitive (*). — Un échantillon formant un circuit magnétique homogène, amené à l'état magnétique $\mathfrak{B}$ par un processus déterminé, passera, quand l'intensité $\mathfrak{H}$ du champ décroîtra, par une suite d'états magnétiques que l'on pourra représenter par le diagramme fig. 10. Quand l'intensité $\mathfrak{H}$ deviendra nulle, l'induction $\mathfrak{B}$ conservera, dans l'échantillon, une certaine valeur OR que l'on appelle *induction rémanente,* et pour annuler l'induction, il faudra donner à l'intensité du champ une certaine valeur négative OC que l'on appelle *force coercitive.* L'une et l'autre de ces grandeurs sont fonction de l'histoire magnétique de l'échantillon. Si cependant on soumet cet échantillon à une suite d'opérations périodiques, si, par exemple, on y fait agir une force magnétisante dont la grandeur oscille périodiquement entre des grandeurs données, les diagrammes représentatifs des états consécutifs de l'échan-

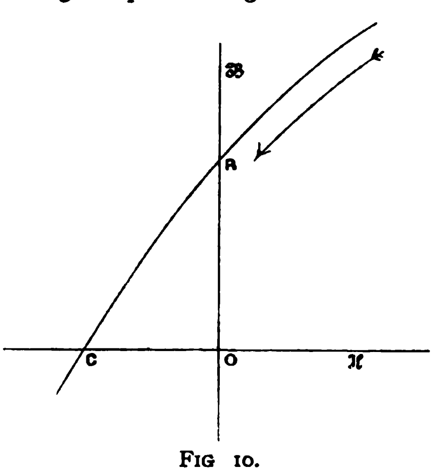


FIG 10.

(*) COLARD, *Bulletin de la Société belge d'électriciens* de 1901, p. 178.

tillon pendant les périodes successives se superposeront bientôt. Il s'établit un certain régime, la forme du diagramme ne dépendant plus pratiquement de tous les états antérieurs et n'étant plus fonction que des maxima et minima de l'intensité $\mathcal{H}$ ou de l'induction $\mathcal{B}$ et, bien entendu, de la nature de l'échantillon. Le diagramme des états $\mathcal{H}$, $\mathcal{B}$ s'appelle alors le cycle magnétique relatif aux limites $\mathcal{B}_m$ et $-\mathcal{B}_m$ de l'induction, dans la série périodique d'opérations.

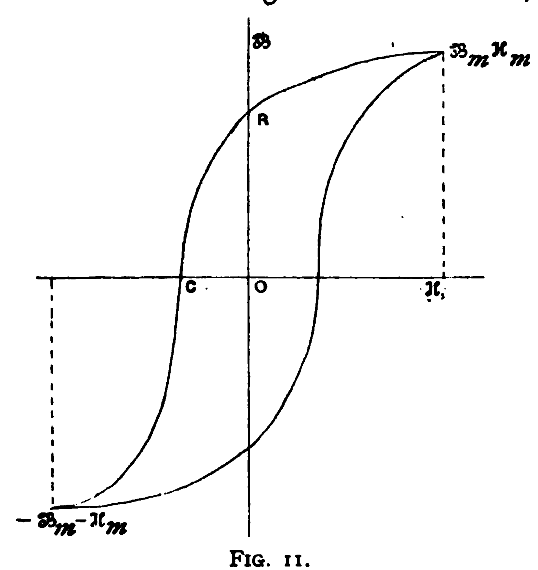


Fig. 11.

La figure 11 montre la forme d'un tel cycle limité à deux valeurs égales et de sens contraires de l'induction. Ce cycle représente une manière d'être de la substance, abstraction faite de sa forme géométrique et de ses dimensions, puisque $\mathcal{B} = \frac{\mathfrak{M}}{s} = 4\pi n_1 i\mu$.

L'induction rémanente OR et la force coercitive OC sont donc simplement fonctions de l'induction maximum $\mathcal{B}_m$ et de la nature de la substance.

Remarques sur les matériaux magnetiques usuels. — On a reconnu ainsi que dans la plupart des cas de la pratique, le fer doux a une induction rémanente absolument comparable à celle de l'acier. On peut même dire, d'une façon générale, qu'il conserve une plus grande portion de l'induction qu'on lui a communiquée. *Mais il a une force coercitive beaucoup moindre.* C'est ainsi que si, après avoir porté l'in-

duction $\mathfrak{B}$ dans un échantillon à une valeur $\mathfrak{B}_m = 10\,000$, on diminue l'intensité du champ $\mathfrak{H}$ jusque 0, on aura pour l'induction rémanente OR :

pour le fer doux recuit . . . . 9 000 environ;
» l'acier recuit 7 000;
» la fonte grise douce . . 4 000.

Les forces coercitives OC correspondant à une induction maximum $\mathfrak{B}_m = 13\,000$ seront :

Fer doux recuit 2
Acier recuit 25
Acier trempé . . . . 40 et davantage pour les aciers spéciaux.

Nous en retiendrons donc que le fer doux conserve tout autant et même plus d'induction rémanente que l'acier, mais on peut la faire disparaître beaucoup plus aisément.

Conclusions pratiques. — Pour construire des aimants permanents qui doivent garder le plus longtemps possible leur magnétisme, nous utiliserons de l'acier trempé, dont la force coercitive est plus grande; dans les machines électriques, où nous devons sous l'action du passage d'un courant produire des flux intenses, nous recourrons de préférence au fer doux, à l'acier doux ou, par raison d'économie, à la fonte douce.

Influence démagnétisante d'un entrefer. — Considérons maintenant (fig. 12) un circuit magnétique constitué par un fer (fer doux, acier, fonte) de longueur moyenne l, de section moyenne s, de perméabilité moyenne μ, et un entrefer de longueur moyenne l', de section moyenne s', de perméabilité 1.

Nous aurons :

$$\mathfrak{N} = \frac{4\pi ni}{\frac{l}{\mu s} + \frac{l'}{s'}}.$$

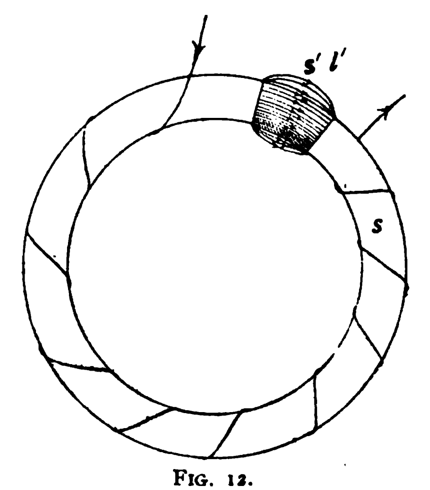


Fig. 12.

Pour simplifier, appelons longueur réduite de l'entrefer λ, la longueur d'un entrefer de même réluctance et ayant une section s égale à celle du fer, c'est-à-dire posons :

$$\frac{\lambda}{s} = \frac{l'}{s'};$$

il vient :

$$\mathcal{N} = \frac{4\pi nis}{\frac{l}{\mu} + \lambda}.$$

L'induction dans le fer sera

$$\mathcal{B} = \frac{\mathcal{N}}{s} = \frac{4\pi ni}{\frac{l}{\mu} + \lambda},$$

et puisque $\mu = \frac{\mathcal{B}}{\mathcal{H}}$,

$$\mathcal{B} = \frac{4\pi ni}{\frac{l\mathcal{H}}{\mathcal{B}} + \lambda}, \quad \text{d'où} \quad 4\pi ni = l\mathcal{H} + \mathcal{B}\lambda \quad \text{et} \quad \mathcal{H} = \frac{4\pi ni - \mathcal{B}\lambda}{l} \quad (1).$$

On en conclut que *l'intensité du champ* $\mathcal{H}$ *dans le fer n'est pas proportionnelle à la force magnétomotrice appliquée* $4\pi ni$, *mais à cette force magnétomotrice diminuée d'une quantité* $\mathcal{B}\lambda$ *qui est la force contre-magnétomotrice ou démagnétisante due à l'entrefer et qui est elle-même égale au produit de l'induction dans le fer par la longueur réduite de l'entrefer,* ou encore : *l'intensité du champ* $\mathcal{H}$ *dans le fer est égale à la force magnétomotrice résultant de la superposition de la force magnétomotrice appliquée et de la force contre-magnétomotrice due à l'entrefer, rapportée à la longueur du fer.*

L'intensité du champ $\mathcal{H}$ dans le fer ne s'annule donc pas nécessairement en même temps que la force magnétomotrice appliquée. L'entrefer exerce sur le fer une action démagnétisante qui sera plus ou moins prononcée suivant la forme et les dimensions du fer considéré (puisque λ est fonction de s), suivant aussi la nature du fer (puisque $\mathcal{B}$ est fonction de μ).

La valeur de l'induction rémanente que conserve le fer quand, ayant été porté à la même induction maximum $\mathcal{B}_m$ que tantôt, on supprime la force magnétisante appliquée, est donc fournie par l'équation (1), dans laquelle on pose $4\pi ni = 0$, ce qui donne $\mathcal{B} = -\frac{l}{\lambda}\mathcal{H}$, équation d'une droite. Cette valeur correspond au point du cycle donné par l'intersection de cette droite et de la courbe cyclique relative à l'échantillon considéré. Ce qui signifie qu'il faudra appliquer à l'échantillon primitif non entr'ouvert, une force magnétisante —OH',

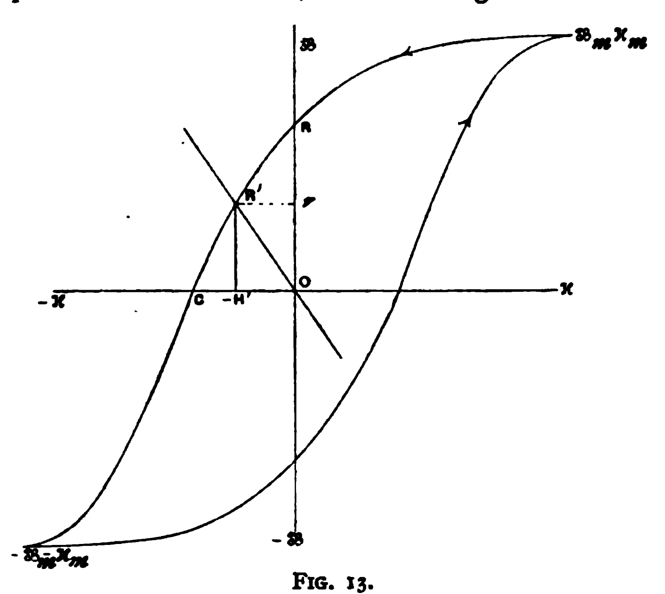


Fig. 13.

pour amener l'induction à la valeur H'R', qu'elle atteint directement par suppression de la force magnétisante quand il existe un entrefer. On a donc en valeur absolue :

$$\frac{Or}{OH'} = \frac{l}{\lambda}.$$

Si l'entrefer est nul, $\lambda = 0$, la tangente de l'angle de direction de la droite avec l'axe des $\mathcal{H} = \infty$, la ligne droite prend la direction de l'axe des $\mathcal{B}$; le point d'intersection vient en R et l'on a $Or = OR$ (fig. 13). Si l'entrefer est d'importance rela-

tive infinie, c'est-à-dire si la partie fer du circuit magnétique se réduit à un feuillet infiniment mince par exemple, le point d'intersection vient en C sur l'axe des $\mathcal{H}$, et l'on a $Or = 0$. Le point d'intersection est d'autant plus bas sur la courbe RC que l'entrefer est relativement plus important. La valeur de $\mathcal{H}$, soit — OH′, correspondant au point d'intersection, est l'intensité du champ démagnétisant dans le fer dû à la présence de l'entrefer : ce champ s'annule quand l'entrefer est nul (intersection en R) et atteint la valeur maximum — OC égale à la force coercitive, quand l'importance relative de l'entrefer est infinie (intersection en C); il est d'autant plus intense que l'entrefer a d'importance relative. Tout ceci ne s'applique, bien entendu, que dans le cas où la force magnétomotrice appliquée atteint, dans la partie descendante du cycle, sa valeur *zéro*.

Si l'on assimile la portion RC du diagramme à une ligne droite, ce qui n'est qu'approximatif, on aura, en appelant R, c, r et h les grandeurs OR, OC, Or et OH′ (fig. 14) :

$$\frac{r}{R} = \frac{c-h}{c}.$$

D'autre part, nous avons vu que

$$\frac{r}{h} = \frac{l}{\lambda}$$

en valeur absolue, d'où l'on déduira

$$r = \frac{Rc}{R\lambda + cl}\,l, \quad h = \frac{Rc}{R\lambda + cl}\,\lambda.$$

Fig. 14.

Exemple numérique. — Supposons un certain cycle $R = 10\,000$, $c = 2$, ce qui correspond à du fer doux. On trouvera qu'un entrefer de longueur réduite λ, égale seulement à un dix-millième de la longueur du fer, suffit pour diminuer de 33 °/o l'induction que conserve le fer après sup-

pression de la force magnétomotrice appliquée. On verra aussi que, pour des entrefers de longueur réduite relative supérieure à 5 %, l'induction rémanente est sensiblement en raison inverse de la longueur relative de l'entrefer.

Influence d'un entrefer au point de vue de la réluctance d'un circuit. — La réluctance $\mathcal{R}$ d'un circuit fer et air est, comme nous venons de le voir,

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu s} + \frac{l'}{s'}.$$

μ atteignant dans les parties de la courbe utilisées dans les machines la valeur 1 000, le second terme sera, en général, très important, et il y aura avantage, afin de réduire la dépense de courant nécessaire pour produire un flux donné $\mathcal{N}$, de diminuer le plus possible l'entrefer.

Application. — Reprenons notre noyau annulaire de 14 centimètres de longueur et d'une section de 2 centimètres carrés. Pratiquons-y une section droite, puis écartons les lèvres de la section de 1 centimètre. Supposons que la section du flux dans l'entrefer reste égale à celle du fer et calculons le nombre d'ampères-tours qui sera dès lors nécessaire pour faire encore traverser le noyau par un flux de 30 000 maxwells.

Nous aurons

$$\mathcal{N} = \frac{4\pi ni \, 10^{-1}}{\frac{l}{\mu s} + \frac{l'}{s'}},$$

dans laquelle $\mathcal{N} = 30\,000$, $l = 14$, $\mu = 526$, $s = 2$, $s' = 2$ et $l' = 1$, d'où $ni = 12\,260$, soit 38,6 fois plus qu'avant !

Hystérésis. — Si nous reprenons la courbe cyclique (fig. 15) obtenue en soumettant un noyau magnétique à des forces magnétisantes égales, successivement croissantes puis décroissantes, avec passage par zéro, nous voyons que l'induction n'a pas les mêmes valeurs lorsque la force magnétisante repasse par des valeurs égales, elle est en retard sur celle-ci.

Ce phénomène constitue l'hystérésis du fer pendant lequel il s'échauffe par suite du travail moléculaire auquel il est soumis. Une partie de l'énergie fournie par le courant se transforme donc en chaleur et est dissipée par rayonnement.

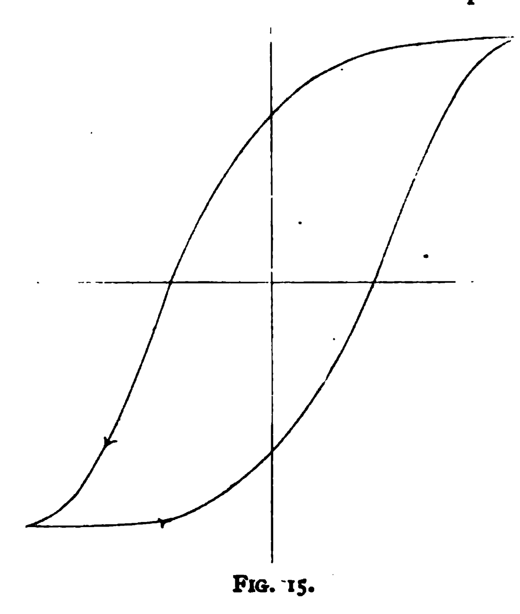


Fig. 15.

Cette quantité d'énergie transformée en chaleur est proportionnelle au volume de fer et à la surface du cycle fermé représentant les valeurs successives de l'induction quand la force magnétisante a parcouru un cycle complet.

On peut admettre que dans le fer, pour des inductions supérieures à 8 000, la perte d'énergie par centimètre cube et cycle, exprimée en joules, est égale à l'induction maximum, diminuée de 5 000 et divisée par 10^7.

Exemple. — Supposons un noyau de 2 000 centimètres cubes passant 18 fois par seconde de l'induction + 17 000 à — 17 000. La perte par cycle sera

$$\frac{17\,000 - 5\,000}{10^7} \cdot 2\,000 = 2{,}4 \text{ joules,}$$

et, comme elle se produit 18 fois par seconde, la perte en puissance sera de $2{,}4 \cdot 18 = 43{,}2$ watts.

Steinmetz a, d'autre part, indiqué une règle plus précise : Si l'on appelle $\mathfrak{B}$ l'induction maximum à laquelle le métal est soumis, η un coefficient qui varie de 0,002 (fer doux) à

0,07 (acier), la perte d'énergie par centimètre cube et par cycle, exprimée en joules, est égale à

$$\frac{\eta \mathcal{B}^{1,6}}{10^7}.$$

Pour un volume V et une fréquence f, la puissance dissipée en chaleur sera

$$\frac{\eta \cdot \mathcal{B}^{1,6} \cdot Vf}{10^7}.$$

Force portante des électro-aimants. — Aux points de sortie des lignes de force du noyau magnétique d'un électro-aimant, on constate la production de pôles, c'est-à-dire de plages où semblent concentrées les propriétés magnétiques d'attraction et répulsion : un pôle nord là où le flux sort ; un pôle sud là où il rentre.

Si l'on approche de ce noyau un objet en fer doux, celui-ci

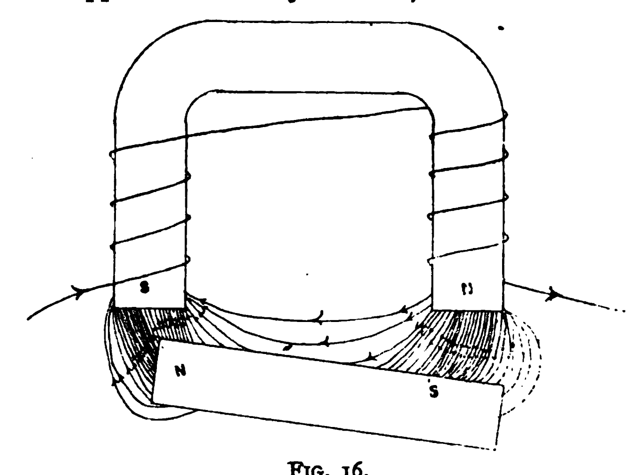


FIG. 16.

s'aimante par influence, d'où résulte une attraction entre les deux corps.

Cette attraction peut encore s'expliquer par la considération du flux magnétique lui-même. Les lignes de force, trouvant un circuit moins réluctant dans le morceau de fer doux, emprunteront sa masse en grand nombre s'il est suffisamment rapproché (fig. 16), et, en vertu de la tendance des

lignes de force à se raccourcir, tendront à le tirer sur le noyau. Cette action sera d'autant plus énergique que le morceau de fer doux aura ses deux extrémités polaires plus rapprochées des extrémités polaires du noyau. Le maximum d'attraction aura lieu lorsque les pièces arriveront au contact, et il sera d'autant plus net que le nombre de lignes de force sera plus grand, c'est-à-dire, pour une force magnétomotrice donnée, que le circuit sera moins réluctant. Le plus faible entrefer ayant une grande influence nuisible, il y aura lieu de le réduire le plus possible, en rodant parfaitement les surfaces s'appliquant l'une sur l'autre.

La force portante d'un électro-aimant, exprimée en unités CGS, est donnée par la formule

$$P = \frac{\mathcal{B}^2 s}{8\pi}.$$

Pour une force portante déterminée, il y a intérêt, afin d'économiser les matériaux, d'admettre pour $\mathcal{B}$ la plus grande valeur possible, puisque alors s acquerra sa valeur minimum.

Or, si l'on examine la courbe du magnétisme, on voit qu'il n'est pas avantageux de dépasser l'induction de 16000, parce qu'au delà, les accroissements de l'induction deviennent de plus en plus faibles par rapport à ceux de la force magnétisante. On se donnera donc $\mathcal{B} = 16\,000$. Dès lors, si P est connu, s est déterminé, et le problème du calcul d'un électro-aimant apte à développer une force portante fixée revient à la détermination des bobines capables de produire le flux $\mathcal{B}s$.

Application. — Quelles sont les dimensions et le nombre de spires d'un électro-aimant qui, traversé par un courant de 5 ampères, donne une force portante de 25 kilogrammes ?

Le kilogramme correspondant à 981 000 dynes et $\mathcal{B} = 16000$, la formule écrite précédemment donne

$$s = \frac{25 \cdot 981\,000 \cdot 8 \cdot 3{,}14}{16\,000} = 2{,}4 \text{ centimètres carrés.}$$

Adoptons pour notre électro-aimant la forme en fer à cheval (fig. 16). Comme nous aurons alors deux couples de surfaces

portantes ayant la même efficacité (points de contact de l'armature et des noyaux), nous pourrons prendre une section moitié moindre, soit 1,2 centimètre carré.

Nous avons vu que le flux

$$\mathcal{N} = \frac{4\pi n i \mu s}{10 l} \quad \text{ou} \quad 4\pi n i = \frac{10 \mathcal{N} l}{\mu s} = \frac{10 \mathcal{B} l}{\mu},$$

i étant exprimé en ampères. Telle est la force magnétomotrice nécessaire.

La table donnée plus haut montre que, pour l'induction 16 000, la perméabilité est égale à environ 300; l sera mesuré sur l'épure de l'électro-aimant que l'on aura pu dresser dès que l'on connaît s. Admettons 14 centimètres.

$$4\pi n i = \frac{10 \cdot 16\,000 \cdot 14}{300} = 7\,460,$$

d'où $ni = 594$, et enfin, i étant égal à 5, le nombre total de spires sera $\frac{594}{5} = 118$, soit enfin 59 spires pour chacune des bobines chaussant les branches de l'électro-aimant. Le fil utilisé aura une section de 2,5 millimètres carrés, si l'on admet une densité de courant de 2 A par millimètre carré.

FORME A DONNER AUX EXTRÉMITÉS POLAIRES. — Reprenons la formule

$$P = \frac{\mathcal{B}^2 s}{8\pi},$$

dans laquelle s représente la surface de contact supposée égale à celle des noyaux. Si on la réduit progressivement, les lignes de force vont s'y concentrer vu la grande réluctance du milieu ambiant. $\mathcal{B}$ augmentera et, dans certaines limites, la force portante augmentera aussi. Le maximum d'effet sera donc obtenu en donnant aux extrémités polaires une forme conique que l'on remarque dans les appareils de levage et ceux utilisés en chirurgie pour l'extraction des objets en fer de l'organisme.

§ 3. — L'INDUCTION.

Loi générale de l'induction. — Considérons un circuit de résistance totale r, alimenté par une source de force électromotrice e, siège d'un courant dont l'intensité donnée par la loi d'Ohm est

$$i' = \frac{e}{r}.$$

Nous savons que des conducteurs traversés par un courant sont enveloppés d'un champ magnétique circulaire, qui est en quelque sorte rivé sur eux. Si le circuit considéré est plongé dans un champ magnétique qui le traverse, la déformation de ses lignes de force, sous l'effet de celles du champ, sollicite les conducteurs à se déplacer, tout comme deux aimants placés à proximité l'un de l'autre s'influencent réciproquement.

Rendons, par un moyen quelconque, un de nos conducteurs mobile, par exemple en piquant ses extrémités recourbées à travers deux bouchons flottant sur deux bains de mercure raccordés, au reste du circuit, nous le verrons immédiatement se déplacer, avec production d'un travail $d\mathrm{T}$ pendant le temps dt. Ce travail ne peut s'accomplir qu'aux dépens de la source, seul générateur d'énergie du système, et comme e et r sont constants par hypothèse, il faut nécessairement que le courant ait pris une nouvelle valeur i, telle que

$$eidt = i^2rdt + d\mathrm{T}.$$

Mais, en vertu de la règle de Faraday, le travail accompli par un conducteur se déplaçant dans un champ est égal au produit de l'intensité du courant par le nombre de lignes de force coupées pendant le déplacement. Donc

$$dt = id\mathfrak{N}, \quad \text{d'où} \quad eidt = i^2rdt + id\mathfrak{N}$$

et enfin

$$i = \frac{e - \dfrac{d\mathfrak{N}}{dt}}{r}.$$

Le numérateur étant nécessairement homogène, le terme

$$-\frac{d\mathcal{N}}{dt}$$

doit représenter une force électromotrice qui, ainsi que son signe l'indique, tend à diminuer l'intensité du courant.

D'une manière générale, l'effet de l'induction est donc de développer une force électromotrice

$$e_i = -\frac{d\mathcal{N}}{dt}.$$

Supprimons le générateur d'électricité, faisons parcourir au conducteur mobile *le même chemin qu'auparavant pendant le même temps,* tout sera resté le même, sauf que $e = 0$.

Nous aurons

$$i = \frac{\frac{-d\mathcal{N}}{dt}}{r}.$$

Cette dernière équation montre qu'un circuit immobile, traversé par un flux magnétique variable, est également le siège d'une force électromotrice d'induction *toujours égale et de signe contraire au taux de variation du flux rapporté au temps.*

Règle de Maxwell. — Si l'on suppose qu'un tire-bouchon avance en tournant dans la direction du champ, le sens de la rotation indique le sens positif de la force électromotrice. Or, lorsque le flux ou le nombre de lignes de force diminue, la force électromotrice

$$\frac{-d\mathcal{N}}{dt}$$

est positive, puisque l'accroissement $d\mathcal{N}$ est négatif. Si le flux augmente, elle est négative, puisque alors l'accroissement $d\mathcal{N}$ est positif, c'est-à-dire qu'elle est orientée en sens inverse du mouvement du tire-bouchon. En résumé, *la force électromotrice est orientée dans le sens de la rotation d'un tire-bouchon enfoncé dans la direction des lignes de force lorsque le flux décroît; elle est orientée en sens inverse quand le flux croît.*

Cette règle est en défaut, notamment quand le conducteur est rectiligne. Mais, comme l'a fait remarquer M. Cruciani (*), on peut facilement l'adapter à tous les cas qui peuvent se présenter. Les lignes de force étant considérées comme des filets déformables, le conducteur qui les coupe les fait d'abord fléchir (fig. 17), et il suffit d'appliquer aux lignes de force

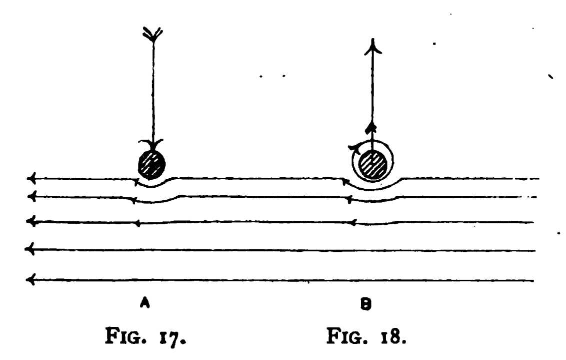


FIG. 17. FIG. 18.

déformées la règle du tire-bouchon. Par exemple, soit un champ dirigé de droite à gauche et coupé par un conducteur animé d'un mouvement de haut en bas. Les lignes de force tendront à s'enrouler autour de lui, comme l'indique le dessin, et, en faisant tourner un tire-bouchon dans le sens de l'enroulement, on en déduit que la force électromotrice est dirigée de l'observateur vers la feuille de papier. En déplaçant le conducteur en sens contraire, soit de bas en haut, les lignes magnétiques s'enroulent inversement et la force électromotrice induite sera renversée.

Si, au lieu d'être mû mécaniquement, on envoie dans le conducteur le même courant que celui se produisant dans le premier cas (fig. 17) lorsqu'on ferme son circuit, puis qu'on le laisse libre de se mouvoir, les lignes de force engendrées par le courant se composent avec celles du champ pour prendre la forme de la figure 18, et, en vertu de la tendance

(*) *Bulletin de l'Association des Ingénieurs-électriciens de l'Institut Montefiore*, t. I de 1890, p. 331.

qu'ont les lignes de force à se raccourcir, le conducteur est sollicité à se déplacer vers le haut, c'est-à-dire en sens inverse du mouvement qui doit lui être imprimé pour développer le même courant. On en conclut que, par suite des réactions électromagnétiques prenant naissance, **loi de Lenz** : *La force électromotrice induite, développée par le déplacement d'un conducteur dans un champ, produit un courant qui s'oppose au mouvement.* L'énergie de ce courant est la contre-partie de l'énergie mécanique dépensée pour mouvoir le circuit en vertu de la loi de la conservation de l'énergie, à part, bien entendu, les inévitables déchets que nous rencontrons dans toute transformation d'énergie, ici frottements, effet Joule, etc.

Règle de Faraday. — La variation totale du flux à travers un circuit étant la somme algébrique des flux élémentaires coupés par ses diverses parties, on peut interpréter la loi générale de l'induction en disant que la force électromotrice développée dans un conducteur est mesurée à chaque instant par le flux de force coupé en l'unité du temps. En d'autres termes, s'il s'agit d'un conducteur rectiligne, par exemple, la force électromotrice est égale à l'intensité du champ multipliée par la projection, sur un plan perpendiculaire aux lignes de force, de la surface balayée par le conducteur dans l'unité de temps.

Cas particuliers. — Si deux circuits fixes sont voisins et parallèles, quand un courant prend naissance dans l'un d'eux, il envoie un flux magnétique croissant à travers l'autre, d'où production d'une force électromotrice négative et courant induit négatif, de sens contraire au courant *inducteur;* quand le courant inducteur cesse, le flux magnétique qu'il avait créé disparaissant, le circuit induit est le siège d'une force électromotrice positive, d'où courant positif ou de même sens que le courant inducteur.

De même, en approchant d'un circuit fixe un circuit parcouru par un courant constant, le circuit fixe se trouvera traversé par le flux magnétique croissant dû au circuit mobile, d'où production d'un courant négatif; puis, quand on

éloignera le circuit inducteur, le courant changera de sens pour devenir positif ou de même sens que le courant inducteur.

Courants de Foucault. — Le circuit fixe voisin du circuit mobile ou, ce qui revient au même, d'un aimant mobile peut être massif. Les courants qui s'y développeront portent alors le nom de *courants de Foucault*. Si les variations magnétiques sont rapides, les courants pourront devenir très intenses, la résistance du milieu où ils se propagent étant faible. La direction de ces courants se déterminera très aisément, en considérant quelles sont les figures formées dans le corps induit qui sont le siège de *variations* de flux, et se rappelant qu'un conducteur circulaire revêt la forme géométrique présentant le moindre périmètre, donc la moindre résistance à surface embrassée égale.

Par exemple, pour un disque dont on approche normalement du centre un aimant, les trajets des courants de Foucault sont des circonférences concentriques au disque ou, en général, à l'axe de l'aimant inducteur. On empêchera la production de ces courants en découpant le solide normalement à la direction des forces électromotrices induites. Le disque sera donc subdivisé suivant des rayons suffisamment rapprochés, si l'on veut y éviter la production de courants de Foucault.

Coefficient de selfinduction. — Le coefficient de *selfinduction* d'un circuit traversé par un courant est, comme on sait, le rapport du flux produit par le courant à l'intensité de ce dernier. Ce coefficient, habituellement désigné par $\mathcal{L}$, dépend de la forme du circuit et du milieu dans lequel il est plongé. En effet, la forme du circuit électrique a une influence directe sur les dimensions du circuit magnétique, donc sur la réluctance et, par suite, sur le flux, tandis que la nature du milieu ambiant intervient au point de vue de la perméabilité. Si la bobine est complètement entourée de fer, nous avons vu précédemment (tableau, p. 17) que pour les faibles inductions notamment, la perméabilité peut être

plusieurs milliers de fois plus grande que dans l'air, ce qui majore d'autant le coefficient de *selfinduction*.

Par définition, le flux de force que produit le courant i à travers son propre circuit sera $\mathcal{L}i$.

Il résulte de ce que nous venons de rappeler, que le coefficient $\mathcal{L}$ est en général variable, les variations étant corrélatives de celles de la perméabilité. Il est constant et *minimum* pour un enroulement donné, lorsque le circuit magnétique est exclusivement constitué de substance non magnétique, l'air par exemple, ou de substance magnétique entièrement saturée. Dans ces deux cas $\mu = 1$. $\mathcal{L}$ est pratiquement constant dans la partie sensiblement droite BC (fig. 9) de la courbe du magnétisme.

Quoi qu'il en soit, il y aura donc lieu, pour le préciser, non seulement d'indiquer l'intensité du courant traversant la bobine, mais encore, pour pouvoir tenir compte de l'hystérésis, de spécifier les états magnétiques antérieurs.

Soit une bobine enroulée régulièrement autour d'un axe circulaire.

En appelant n_1 le nombre de spires par centimètre suivant son axe et s la section, le flux magnétique intérieur est exprimé pour un courant i par

$$\mathcal{H}s = 4\pi n_1 i s.$$

Le flux total traverse successivement les n spires de la bobine. Par suite le flux à travers celle-ci est :

$$\mathfrak{N} = n \, . \, \mathcal{H}s$$

et le coefficient de *selfinduction* a par définition pour valeur :

$$\mathcal{L} = \frac{\mathfrak{N}}{i} = 4\pi n_1 n s = \frac{4\pi n^2 s}{l}.$$

Il est donc proportionnel au carré du nombre de spires.

Une telle bobine ayant 10 spires par unité de longueur, une longueur de 30 centimètres et une section de 5 centi-

mètres carrés aurait un coefficient de *selfinduction* constant de $1,88 . 10^5$ unités CGS ou

$$\frac{1,88 . 10^5}{10^9} = \frac{1,88}{10^4} \text{ henrys.}$$

S'il y a dans la bobine un noyau en fer de perméabilité actuelle μ, le coefficient devient :

$$\mathcal{L}' = 4\pi n_1 n s \mu.$$

Cette expression est applicable à un électro-aimant droit de grande longueur, à condition de négliger l'influence des extrémités. Vers celles-ci, en effet, les lignes de force divergent et sortent latéralement, produisant une dispersion du flux.

La valeur élevée que peut acquérir le coefficient μ explique les effets inductifs infiniment plus considérables que ceux des bobines sans noyau, fournis par les électro-aimants.

Nous pouvons maintenant donner à la force électromotrice de *selfinduction* une forme moins générale que précédemment.

Le flux total $\mathcal{N}$ issu d'un circuit électrique possédant un coefficient de *selfinduction* $\mathcal{L}$ et traversé par un courant i étant $\mathcal{N} = \mathcal{L}i$, nous aurons

$$e_s = -\frac{d\mathcal{N}}{dt} = -\frac{d(\mathcal{L}i)}{dt} = -\frac{\mathcal{L}di}{dt},$$

si $\mathcal{L}$ est constant.

Lorsque le courant croît, di est positif et la force électromotrice de *selfinduction* est négative ; *elle s'oppose à l'établissement du courant.* Quand le courant décroît, la force électromotrice est positive; elle donne lieu à une force électromotrice directe *s'ajoutant à celle de la source.*

Si le circuit électrique est plongé en tout ou en partie dans un champ magnétique préexistant, celui-ci et le champ dû au courant se combinent pour donner un champ résultant dont il faut éventuellement tenir compte, pour déterminer la perméabilité des diverses parties du circuit magnétique. Si les deux champs sont de même sens, ils s'ajoutent; s'ils

sont de sens inverse, ils se retranchent; dans tous les autres cas, ils se composent suivant la règle du parallélogramme des forces.

Enroulements sans induction. — Il peut être utile de disposer d'enroulements dépourvus de *selfinduction*. Comment les obtenir? Considérons pour cela un bobinage effectué au moyen de deux fils isolés enroulés simultanément. Ceci nous donne deux enroulements à nombre de spires égaux agissant sur le même circuit magnétique et y produisant, en vertu de la relation générale trouvée précédemment, des flux égaux et de même polarité quand ils seront parcourus par des courants égaux et de même sens

$$\mathcal{F} = \frac{4\pi n i}{\mathcal{R}}.$$

Réunissons maintenant entre eux les deux enroulements à une de leurs extrémités communes, et admettons-y un courant quelconque. Après avoir traversé un des enroulements, le courant traversera l'autre *en sens inverse*. Il tendra donc, dans ce second enroulement, à développer un flux égal et contraire

$$\mathcal{F} = -\frac{4\pi n i}{\mathcal{R}},$$

de sorte que l'effet magnétique résultant sera nul.

De la même manière, deux fils droits voisins ou deux conducteurs cordés ensemble, ne donnent pas lieu à des effets d'induction appréciables, quand ils sont traversés par des courants égaux et opposés.

Quantité d'électricité induite. — Lorsque le flux qui traverse un circuit varie de o à une quantité $\mathcal{N}$, l'intensité du courant induit est, à un moment quelconque :

$$i = \frac{-\frac{d\mathcal{N}}{dt}}{r}$$

et la quantité totale d'électricité induite est en conséquence

$$q = \int_0^t idt = \int_0^{\mathcal{N}} - \frac{d\mathcal{N}}{r} = - \frac{\mathcal{N}}{r}.$$

Si le flux revient ensuite à zéro, la quantité d'électricité induite est

$$\int_{\mathcal{N}}^0 - \frac{d\mathcal{N}}{r} = \frac{\mathcal{N}}{r}$$

égale à la précédente, mais de signe contraire, c'est-à-dire qu'elle se déplace en sens inverse.

Énergie intrinsèque d'un courant. — Le champ magnétique créé par un courant correspond à un emmagasinage d'énergie dont il est facile de supputer l'importance.

L'expression de l'énergie intrinsèque d'un circuit sera, en effet, mesurée par la différence entre l'énergie fournie par la source de force électromotrice E, qui l'alimente, et celle absorbée par effet Joule durant la période variable. De l'équation générale

$$i = \frac{E - \mathcal{L}\frac{di}{dt}}{r}$$

on tire :

$$\int_0^t Eidt - \int_0^t i^2 rdt = \int_0^I \mathcal{L}idi = \frac{\mathcal{L}I^2}{2}.$$

Exemple. — Un électro-aimant d'une *selfinduction* de 25 henrys est traversé par un courant de 10 ampères.

L'énergie potentielle emmagasinée est

$$\frac{2\,500}{2} = 1\,250 \text{ joules} = 1\,250 \,.\, 10^7 \text{ ergs}$$

$$= \frac{1\,250}{9{,}81} = 127{,}5 \text{ kilogrammètres.}$$

Si à la rupture du circuit cette énergie se dissipe en $^1/_2$ seconde, la puissance développée correspond à

$$\frac{127,5 \times 2}{75} = 4,73 \text{ chx.}$$

D'autre part, si la rupture est très rapide, la variation du flux est brusque, de sorte que la force électromotrice induite peut atteindre des valeurs dangereuses.

Induction mutuelle. — Le coefficient d'induction mutuelle de deux circuits est le *rapport du flux qui traverse l'un des circuits à l'intensité du courant dans le circuit voisin.* C'est donc le flux magnétique qu'y envoie l'unité de courant passant dans le circuit voisin. On le désigne habituellement par $\mathcal{M}$. Il dépend de la forme des circuits en présence et de la nature du milieu qui les environne.

Soit un circuit voisin d'un autre, le coefficient d'induction mutuelle étant $\mathcal{M}$. Quand un courant i_2 parcourt l'un d'eux, le flux traversant l'autre sera $\mathcal{N} = \mathcal{M}i_2$, et il naîtra la force électromotrice

$$e_m = -\frac{d\mathcal{N}}{dt} = -d\frac{\mathcal{M}i_2}{dt}.$$

Si $\mathcal{M}$ est constant,

$$e_m = -\mathcal{M}\frac{di_2}{dt}.$$

S'il existe déjà dans le circuit influencé dont la résistance et le coefficient de *selfinduction* sont r_1 et $\mathcal{L}_1$ un courant variable i_1 produit par une force électromotrice variable qui a pour valeur e_1 au moment considéré, l'application de la deuxième loi de Kirchhoff nous donnera

$$e_1 - \frac{\mathcal{L}_1 di_1}{dt} - \mathcal{M}\frac{di_2}{dt} = i_1 r_1.$$

Influence de la forme du circuit magnétique sur son efficacité au point de vue des phénomènes d'induction. — Nous avons vu que dans le cas d'une bobine annulaire

enroulée sur un tore en fer, toutes les lignes de force restent confinées dans ce dernier. Le flux a pour valeur

$$\mathcal{N} = 4\pi n n_1 s \mu i$$

pour le courant i traversant l'enroulement et pour une perméabilité μ du noyau, ce qui assigne au coefficient de *self-induction* la valeur $\mathcal{L} = 4\pi n n_1 s \mu$.

Si nous renversons le courant, le flux est renversé également et devient $\mathcal{N} = -4\pi n n_1 s \mu i$. Sa variation est donc $4\pi n n_1 s \mu i - (-4\pi n n_1 s \mu i) = 8\pi n n_1 s \mu i$ pour une variation de $2i$ du courant, en sorte que par définition, le coefficient de *self-induction* a gardé la valeur $\mathcal{L}$ écrite plus haut et ainsi de suite pour les mêmes courants consécutifs.

Lorsqu'au lieu de diminuer progressivement le courant pour lui donner des valeurs négatives atteignant l'intensité primitive, nous le supprimons, repartons de zéro et le faisons réaugmenter positivement jusqu'à la même valeur i, le noyau, après suppression du courant, reste le siège d'une induction considérable ($\mathcal{B}_o$ = OR, fig. 11), de sorte que la variation de courant de o à i provoque seulement le passage du flux $(\mathcal{B}_m - \mathcal{B}_o)s$ dans chaque spire, au lieu de $\mathcal{B}_m s$.

Ceci n'a lieu que dans l'hypothèse d'un circuit magnétique fermé. Au contraire, nous avons vu que si le noyau présente une solution de continuité, le flux développé disparaît presque complètement avec le courant qui lui a donné naissance, sous l'influence démagnétisante de l'entrefer.

Cette remarque est très importante. Elle reçoit notamment son application dans la construction des bobines d'induction, dont le circuit magnétique est ouvert ou fermé, suivant que le courant inducteur (qui doit produire le champ variable que l'appareil transforme en courants induits utilisés) est intermittent et toujours de même sens, ou dirigé tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, c'est-à-dire alternatif.

CHAPITRE II

GROUPEMENT DES GÉNÉRATEURS D'ÉLECTRICITÉ; PUISSANCE ET RENDEMENT

On distingue dans tout générateur d'électricité un pôle négatif ou à bas potentiel et un pôle positif ou à haut potentiel. Les pôles sont matérialisés par des bornes où viennent se fixer les fils de raccordement. Quand on réunit les deux bornes du générateur par une résistance, le courant émis sort par le pôle positif, traverse le circuit *extérieur* et rentre passer dans le circuit *intérieur* de la source par le pôle négatif. Rappelons que ce sens de circulation n'a que la valeur d'une convention, puisque la nature intime de l'électricité est inconnue. Entre les deux bornes règne une différence de potentiel qui, à circuit ouvert, caractérise la source. Sans faire encore aucune hypothèse sur la nature du générateur, nous appellerons chaque générateur un *élément;* la réunion de plusieurs éléments constituera une *batterie* ou *pile*.

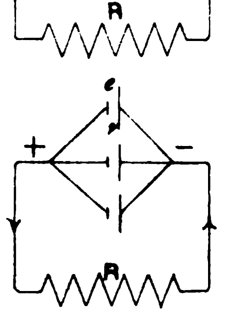


FIG. 19 et 20.

Groupement en série. — Dans le groupement en série ou en tension (fig. 19), le pôle positif d'un élément est connecté au pôle négatif de l'élément suivant et ainsi de suite. Les éléments sont donc réunis de manière à former une chaîne dans laquelle les forces électromotrices de chacun d'eux sont dirigées dans le même sens et produisent des accroissements successifs de potentiel.

Si E est la force électromotrice de chaque élément, *r* leur résistance intérieure, R la résistance extérieure sur laquelle ils travaillent : la force

électromotrice de la chaîne est nE, la résistance intérieure nr et le courant engendré dans le circuit extérieur

$$I = \frac{nE}{nr + R} = \frac{E}{r + \frac{R}{n}}.$$

Groupement en dérivation. — Dans le groupement en dérivation ou en surface, ou en quantité, tous les pôles de même nom sont réunis entre eux (fig. 20). Cela revient, en définitive, à former un nouvel élément dont le positif ait une surface égale à la somme de tous les positifs des éléments couplés; de même pour le négatif. S'il existe encore n éléments associés, la force électromotrice ne sera plus que celle E d'un élément, mais la résistance intérieure se réduit à la valeur $\frac{r}{n}$, résistance combinée de n dérivations de résistance r.

Le courant engendré dans le circuit extérieur a pour valeur :

$$I' = \frac{E}{\frac{r}{n} + R}.$$

Suivant que $r + \frac{R}{n} \gtreqless \frac{r}{n} + R$ ou $r \gtreqless R$,

I est $\lesseqgtr$ I'.

Donc, *le groupement en tension donne un courant d'intensité inférieure, égale ou supérieure à celle fournie par le groupement en quantité, suivant que la résistance intérieure d'un élément est supérieure, égale ou inférieure à la résistance extérieure.*

Si R est très grand par rapport à r, on aura approximativement, avec l'arrangement en tension :

$$I = \frac{nE}{R}.$$

Si, au contraire, la valeur de r est très supérieure à celle de R, l'intensité devient, avec le groupement en surface,

$$I' = \frac{nE}{r},$$

et dans ces deux cas limites, on peut admettre que l'intensité du courant est proportionnelle au nombre des éléments employés.

En résumé, ***quand la résistance des éléments est très faible par rapport à la résistance extérieure, il y a avantage à les grouper en tension ; quand leur résistance est grande, au contraire, il y a intérêt à les monter en dérivation.***

Groupement mixte. — Tels sont les deux modes fondamentaux de groupement des générateurs d'électricité. On les combine, suivant les nécessités de l'application en vue, le plus souvent en plaçant en dérivation, l'une par rapport à l'autre, des séries comprenant le même nombre d'éléments.

Lorsque n éléments sont mis en série, la pile résultante a une force électromotrice nE et une résistance intérieure nr. En plaçant en dérivation m séries semblables, la force électromotrice reste nE, mais la résistance intérieure tombe à $\frac{nr}{m}$. Le courant débité dans une résistance extérieure R sera

$$I = \frac{nE}{\frac{nr}{m} + R}.$$

Avec un nombre d'éléments $mn = N$, on peut donc former toute une série de combinaisons en les prenant successivement 1 à 1, 2 à 2 (si N est divisible par 2), ...

Courant maximum. — Entre toutes ces combinaisons, la plus avantageuse sera celle fournissant le courant maximum. Or le dénominateur de I est formé par la somme de deux termes dont le produit est constant. Cette somme sera minimum et par suite le courant sera maximum, quand les deux termes sont égaux, c'est-à-dire quand $\frac{nr}{m} = R$ ou quand la résistance intérieure de la pile est égale à la résistance exté-

rieure. En remplaçant successivement m et n par leur valeur en fonction de N, cette condition devient

$$n = \sqrt{\frac{RN}{r}} \quad \text{ou} \quad m = \sqrt{\frac{rN}{R}}.$$

L'intensité maximum est

$$I_m = \frac{nE}{2R} = \frac{mE}{2r}.$$

Montage en échelle d'Amsterdam. — Il peut arriver que l'on doive alimenter divers circuits requérant des forces électromotrices différentes, ceux à faible force électromotrice étant beaucoup plus nombreux que les autres, c'est-à-dire consommant au total beaucoup plus de courant. Dans ce cas, on peut recourir, pour économiser le matériel, à un montage mixte, combinaison irrégulière des deux précédents. On forme des groupements composés d'éléments réunis en quantité, dont le nombre total diminue à mesure qu'on s'éloigne de l'origine de la pile (fig. 21).

FIG. 21.

On effectuera par exemple le montage de la manière suivante :

5	séries de	30	éléments.
4	»	15	»
3	»	10	»
2	»	5	»
1	»	40	»

Les divers circuits d'utilisation sont reliés aux divers échelons EA, EB, ..., d'après la force électromotrice qu'ils requièrent : ceux à grande force électromotrice, moins nombreux, mettent la batterie entière à contribution, et ce sont alors les uniques éléments de queue (en AB) qui travaillent le plus, puisqu'ils débitent *tout* le courant absorbé par ces circuits. Les autres circuits, plus nombreux, viennent puiser le fort courant qu'ils exigent à la base de la batterie, laquelle est à même de le fournir, sans exagérer le débit de chaque série. De cette manière, le débit des éléments est régulier et l'entretien est facilité par le fait que partout où il existe plusieurs rangées, on peut supprimer momentanément une série sans interrompre le fonctionnement de l'ensemble.

Puissance et rendement. — Dans un circuit comprenant une source de force électromotrice E, de résistance r et une résistance extérieure R, l'intensité du courant est

$$I = \frac{E}{r + R}. \qquad (1)$$

Aux bornes de la source règne la différence de potentiel e, en sorte que la puissance utilisable est $p = eI$. L'équation (1) nous donne la valeur de I en fonction des facteurs du circuit. Cherchons de même la valeur de e. On a évidemment $\left(\text{puisque } e \text{ fait traverser la résistance R par le courant I ou } I = \frac{e}{R}\right)$

$$\frac{e}{R} = \frac{E}{r + R}, \quad \text{d'où} \quad e = \frac{ER}{r + R}. \qquad (2)$$

En remplaçant les quantités e et I par leurs valeurs (2) et (1) dans l'expression de la puissance, il vient

$$p = eI = E^2 \frac{R}{(r + R)^2}. \qquad (3)$$

La puissance totale engendrée est $P = EI$, de sorte que le rendement

$$\eta = \frac{p}{P} = \frac{e}{E} = \frac{R}{r + R} = \frac{1}{\frac{r}{R} + 1}. \qquad (4)$$

La puissance utile et le rendement varient donc avec la résistance extérieure R. Cherchons le maximum de la puissance utile en posant $\frac{dp}{dR} = 0$ et vérifiant que $\frac{d^2p}{d^2R}$ est négative. Nous trouvons $R = r$. ***Le maximum de la puissance utile se produit quand la résistance extérieure est égale à la résistance intérieure de la source.*** Cette condition n'a rien qui doive nous surprendre, puisque nous avons vu précédemment que c'est alors que l'élément débite son courant maximum. En l'introduisant dans l'expression de la puissance et du rendement, il vient

$$p_M = \frac{E^2}{4r} \qquad \text{et} \qquad \eta_M = \frac{1}{2}.$$

En se reportant à l'équation (4), on voit que pour $R = 0$, $\eta = 0$. Toute la puissance du générateur mis en court-circuit se dépense en chaleur dans sa résistance intérieure. Quand R croît de 0 à r, la fraction $\frac{r}{R}$ varie de ∞ à 1 et η de 0 à $\frac{1}{2}$. A ce moment, comme nous l'avons vu plus haut, la puissance *utile* est maximum. Quand R continue à croître de r à ∞, la fraction $\frac{r}{R}$ varie de 1 à 0 et le rendement passe de $\frac{1}{2}$ à 1.

Donc, pour obtenir un bon rendement d'un générateur d'électricité, il faut s'éloigner des conditions de travail maximum.

CHAPITRE III

PILES THERMO-ÉLECTRIQUES

§ 1. — GÉNÉRALITÉS.

Effet Volta. — Volta a constaté que deux métaux différents, mis en contact, deviennent le siège d'une différence de potentiel appelée *force électromotrice de contact,* fonction de la nature des métaux juxtaposés et de la température des points de contact.

Loi des contacts successifs. — Soit $+E$ cette différence de potentiel que présentent deux métaux A et B en allant de A à B, et considérons deux tiges de ces métaux jointes à une extrémité. Si, au lieu de les rapprocher par l'extrémité considérée, on avait réuni leurs bouts opposés, on aurait évidemment trouvé la même force électromotrice $+E$ en allant encore de A vers B.

Si maintenant nous réunissons les deux tiges à leurs deux extrémités et parcourons le *circuit* ainsi formé, nous rencontrons d'abord une force électromotrice $+E$ au premier point de contact, puis au deuxième point de contact $-E$, puisque nous marchons en sens inverse de tantôt. On aura donc comme force électromotrice résultante du circuit

$$E - E = o,$$

ce que l'on pouvait d'ailleurs prévoir en vertu du principe de la conservation de l'énergie.

En généralisant, on conclura que : *Dans un circuit fermé constitué par des métaux différents se trouvant à la même température, la somme des forces électromotrices de contact est nulle.*

Effet Seebeck. — Il n'en est plus ainsi si l'équilibre des températures est rompu. Lorsque deux métaux différents forment un circuit et que l'on chauffe ou refroidit une des jonctions, on constate la production d'un courant indiquant qu'une force électromotrice s'est développée.

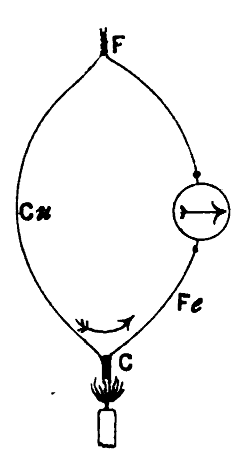


FIG. 22.

Ainsi, en prenant une lame de fer et une de cuivre et les soudant après avoir intercalé un galvanomètre dans l'une d'elles, dès que l'on chauffe une des soudures (fig. 22), le galvanomètre dévie par le passage d'un courant allant du cuivre vers le fer dans la soudure chaude.

La force électromotrice varie avec la nature des métaux en présence et la différence de température des deux jonctions.

Loi des métaux intermédiaires. — Lorsque deux métaux A et B sont séparés dans un circuit par un ou plusieurs métaux intermédiaires, mais qui sont tous maintenus à une même température, la force électromotrice est la même que si les deux métaux A et B étaient directement réunis et leur point de jonction porté à la même température.

La présence d'une soudure réunissant les métaux n'exerce donc aucune influence.

Couple thermo-électrique. — On appelle ainsi l'ensemble de deux soudures portées à des températures différentes et produisant par la force électromotrice, qui se développe, un courant dans le circuit où elles sont intercalées.

Un métal est dit positif par rapport à un autre, lorsque la force électromotrice de contact est dirigée du premier au second à travers la soudure chaude.

Effet Peltier. — Si dans le circuit du couple (fig. 22) nous envoyons un courant dans le sens de la flèche, sans échauffer ni refroidir les soudures, nous constatons que la soudure C

se refroidit, tandis que F s'échauffe. L'effet Seebeck est donc réversible, et ceci nous explique la distribution de l'énergie dépensée dans un couple thermo-électrique : le courant développé tend à refroidir la soudure que l'on chauffe. Il transforme donc la chaleur de la source et la distribue dans le circuit sous forme d'énergie électrique, que l'on peut alors utiliser plus ou moins complètement.

La mesure de la quantité de chaleur absorbée ou développée par l'effet Peltier donne la mesure de la force électromotrice de contact, comme l'a fait remarquer Maxwell. En effet, E étant cette force électromotrice et I le courant, la puissance électrique produite ou absorbée suivant le sens du courant est EI watts. D'autre part, un watt correspondant à $\frac{1}{4,18}$ calorie-gramme par seconde, le nombre de calories absorbées ou produites sera

$$n = \frac{EI}{4,18}, \quad \text{d'où} \quad E = \frac{4,18n}{I} \text{ volts.}$$

Effet Kelvin. — Les deux extrémités d'une barre homogène étant maintenues respectivement aux températures t_1 et t_2, celle-ci est le siège d'une force électromotrice dépendant de la différence des températures et d'un coefficient σ fonction de la température absolue et de la nature du corps, qui porte le nom de *chaleur spécifique d'électricité*.

Voici sa valeur pour quelques métaux usuels :

Cuivre	— 0,014	microvolt	par degré C.
Fer.	+ 0,042	»	»
Laiton	— 0,007	»	»
Palladium.	+ 0,032	»	»
Platine	+ 0,018	»	»
Plomb	0	»	»
Zinc	— 0,033	»	»

Inversion. — En chauffant graduellement une des jonctions du couple cuivre-fer (fig. 22), on constate que la déviation du galvanomètre va en augmentant jusque vers 260°, pour diminuer ensuite et changer de sens *à une température double.*

Ce phénomène d'inversion se présente pour un très grand nombre de couples. Il prouve que la force thermo-électromotrice n'est pas seulement fonction de la différence de température des soudures, mais qu'elle dépend aussi de leur température moyenne

$$E = f\left(t - t', \quad \frac{t + t'}{2}\right).$$

Un certain nombre de couples, dits à *marche uniforme*, semblent soustraits à cette loi, du moins dans les limites de température qui nous sont abordables; leur force thermo-électromotrice est simplement proportionnelle à la différence de température des deux soudures.

Courbes de Gaugain. — En portant en abscisses la différence de température des deux soudures, dont une était maintenue à 20° C., et en ordonnées des valeurs proportionnelles aux forces électromotrices relevées, Gaugain a dressé des courbes analogues à celles de la figure 23. Ce sont des paraboles à axe vertical, montrant nettement que la température d'inversion est double de celle procurant le maximum.

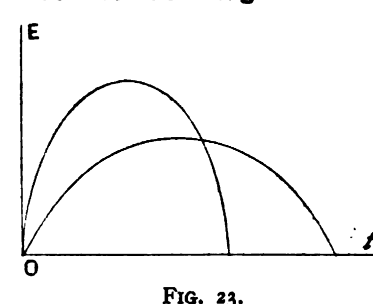


Fig. 23.

Pouvoir thermo-électrique. — Les deux soudures d'un couple étant à une température t, si l'on donne à l'une d'elles un accroissement dt de température, les divers effets analysés ci-dessus se combineront pour donner une force électromotrice dE qui sera proportionnelle à un facteur p, fonction de t. On aura

$$dE = f(t)dt = pdt, \quad \text{d'où} \quad p = \frac{dE}{dt}.$$

p est le *pouvoir thermo-électrique* des deux corps à la température t.

Cette valeur peut être tirée des courbes de Gaugain, car

elle représente précisément le coefficient angulaire de la tangente au point considéré de la courbe.

Voici en microvolts, par degré centigrade, les pouvoirs thermo-électriques de divers métaux par rapport au plomb et à la température de $+20°$ C. (*) :

Antimoine	— 17
Bismuth	89
Cuivre commercial	— 0,1
Fer	— 16,2
Maillechort	12,95
Nickel	22,8
Palladium	6,9
Platine malléable	8,82
Zinc	— 2,79

Il est utile de tracer les courbes de pouvoirs thermo-électriques des divers couples en fonction de la température. De la loi des métaux intermédiaires, on conclut que le pouvoir thermo-électrique de deux métaux A et B, à une température t, est égal à la différence des pouvoirs thermo-électriques de chacun de ces métaux, par rapport à un troisième C quelconque à la même température.

Piles thermo-électriques. — Un couple thermo-électrique ne développant, comme nous venons de le voir, qu'une force électromotrice extrêmement faible, il conviendra, pour obtenir des résultats appréciables, d'en grouper un certain nombre en tension. Comment effectuer le montage? Considérons deux couples formés de métaux A et B (fig. 24) ouverts à leur partie supérieure. En chauffant les deux soudures 1 et 3, nous développerons deux forces électromotrices orientées dans le même sens. Nous obtiendrons, en somme, deux générateurs

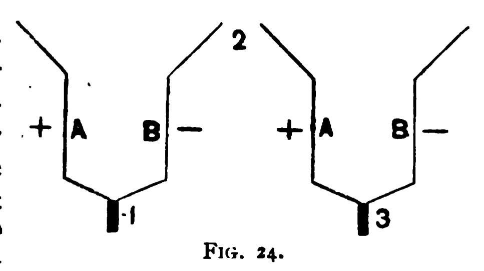


Fig. 24.

(°) Hospitalier, *Formulaire de l'électricien*, 1901, p. 206.

d'électricité ayant leur pôle positif en A, par exemple, leur pôle négatif en B. Pour les monter en tension, il suffira de raccorder le pôle négatif de l'une au pôle positif de l'autre, en effectuant une soudure en 2 entre les lames B et A intermédiaires et ainsi de suite.

On voit que l'on est amené à former une chaîne dont les soudures de même rang, soient toutes les soudures impaires ou toutes les soudures paires, sont chauffées, les autres restant le plus froides possible. On obtient ainsi une pile thermo-électrique.

Pour faciliter le chauffage, d'une part, et le refroidissement, d'autre part, on replie la chaîne en zigzag, de manière à amener toutes les soudures de même rang soit dans un plan, soit suivant un cylindre. En outre, on munit d'expansions métalliques noircies les soudures opposées à la source de chaleur, pour aider au refroidissement.

On évitera éventuellement les coups de feu brusques donnant lieu à des dilatations nuisibles, en protégeant les soudures chaudes par une garniture réfractaire.

§ 2. — DESCRIPTION ET USAGE DE QUELQUES PILES THERMO-ÉLECTRIQUES.

Pile de Nobili et Melloni. — Le thermo-multiplicateur de Nobili comporte des séries de barres de bismuth et d'antimoine coudées à angle droit (fig. 25), soudées l'une à l'autre, isolées au papier verni et affectant, dans leur ensemble, la forme d'un parallélipipède rectangle. Toutes les soudures paires se trouvent sur une des faces, toutes les soudures impaires sur la face opposée.

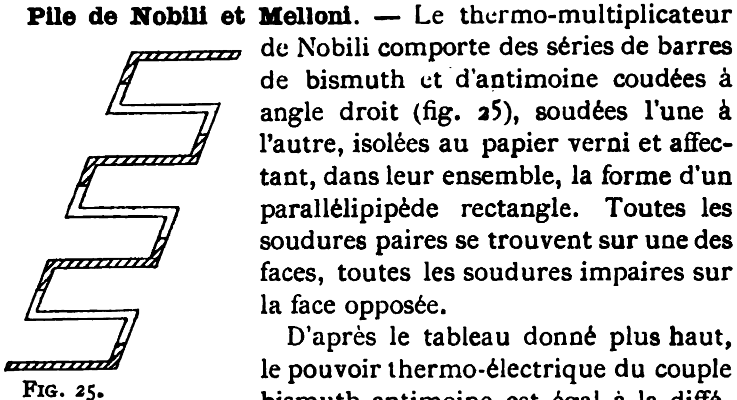


Fig. 25.

D'après le tableau donné plus haut, le pouvoir thermo-électrique du couple bismuth-antimoine est égal à la différence des pouvoirs thermo-électriques de ces métaux par

rapport au plomb, ou $+89-(-17)=106$ microvolts environ à 20° C.

En faisant communiquer une telle pile avec un galvanomètre sensible et de résistance se rapprochant de celle de la pile, il est possible de déceler les plus petites différences de température se produisant entre ses deux faces.

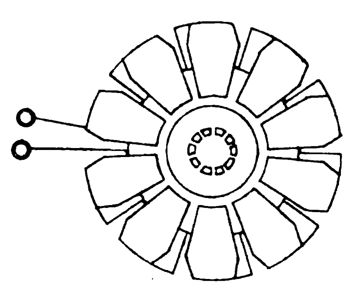
Pile de Noé et Rebicek. — Couple maillechort et alliage zinc-antimoine. Les soudures chaudes sont protégées par un cône en cuivre; les froides, pourvues d'une expansion en cuivre noirci. Les éléments se disposent radialement, de manière à permettre un chauffage général central.

Force électromotrice d'un élément en marche normale 0,06 V; résistance 0,025 O.

Pyromètre Le Chatelier. — Couple de platine et alliage de platine à 0,1 de rhodium. Il peut supporter des températures allant jusque 1 200°.

Pile Clamond et Carpentier. — Couple fer ou nickel et alliage antimoine-zinc par parties égales. Les soudures chaudes sont logées dans un alvéole réfractaire.

On empile l'une au-dessus de l'autre, en les séparant par de l'amiante, des couronnes constituées par dix couples montés en tension (fig. 26). L'ensemble des couronnes ainsi disposées est serré par des boulons entre deux cadres en fonte. Des bornes permettent de les connecter soit en tension, soit en dérivation.


FIG. 26.

On chauffe la pile au gaz, en amenant celui-ci dans un tube en terre réfractaire percé de trous, disposé dans l'évidement cylindrique central de la pile. Un régulateur à valve mobile assure la constance du débit de gaz, malgré les variations de pression.

Le modèle à douze couronnes de dix couples consomme 180 litres de gaz à l'heure. Tout étant monté en tension, on obtient une force électromotrice de 8 volts avec une résistance intérieure de 3,2 ohms.

Rendement. — Les chiffres ci-dessus vont nous permettre d'évaluer le rendement de la pile Clamond et Carpentier, qui est une des mieux comprises au point de vue industriel.

Le modèle à douze couronnes développera sa puissance utile maximum, quand la résistance extérieure sera égale à la résistance intérieure, soit 3,2 O. D'après ce que nous avons vu dans le chapitre précédent, cette puissance

$$p_M = \frac{E^2}{4r} = \frac{64}{12,8} = 5 \text{ watts.}$$

En admettant l'emploi d'un gaz donnant 5 200 calories (kg-degrés) par mètre cube, les 180 litres à l'heure correspondront à

$$\frac{180}{3\,600} \cdot 5,2 = 0,26 \text{ calorie par seconde,}$$

soit

$$\frac{0,26 \cdot 425 \cdot 736}{75} = 1\,085 \text{ watts.}$$

Le rendement ressort à

$$\frac{5}{1\,085} = \frac{1}{217} \text{ environ.}$$

Usages. — La pile thermo-électrique est donc un appareil à mauvais rendement, qu'on ne peut songer à appliquer industriellement aux transformations de l'énergie. Mais elle peut rendre de grands services pour certaines applications spéciales.

Melloni s'en est servi avantageusement dans ses recherches sur la chaleur rayonnante.

Comme l'a fait remarquer Becquerel, elle peut servir de thermomètre différentiel pour mesurer la température d'en-

droits inaccessibles, tels que le fond de trous de forage. En intercalant un galvanomètre sensible dans le circuit d'un couple, puis modifiant graduellement la différence de température des soudures, on peut dresser un diagramme donnant les déviations du galvanomètre en fonction des différences de température, ce qui permettra inversement d'évaluer ces dernières pour des déviations données. Mais il est plus simple et plus exact d'employer une méthode de réduction à zéro. A cet effet, on chauffe ou refroidit la soudure libre installée dans le laboratoire, jusqu'à ce que le galvanomètre ne dévie plus. A ce moment, les deux soudures sont à la même température, que l'on peut aisément connaître au moyen d'un thermomètre ordinaire.

Les métallurgistes mettent couramment à contribution le pyromètre Le Chatelier pour déterminer la température de leurs hauts fourneaux. A cet effet, le couple est mis en circuit avec une résistance connue et un galvanomètre Deprez d'Arsonval. L'intensité du courant développé permet de déduire la température à l'aide d'un diagramme. Celui-ci se dresse en plongeant une des soudures du couple protégée par un revêtement réfractaire, dans des bains de température connue. La fusion du plomb donne une température stable de 325°, celle du zinc de 415, etc.

Enfin, on utilise aussi la pile thermo-électrique dans les laboratoires, où la question de rendement s'efface devant la constance, la facilité d'entretien et de conduite de ce genre de générateur d'électricité.

CHAPITRE IV

ÉLECTROLYSE

Lorsqu'un courant traverse une solution de sels, de bases ou d'acides minéraux ou organiques, il y produit une certaine dissociation. Les corps complexes faisant partie de la solution, qui porte plus spécialement le nom d'*électrolyte,* se séparent en leurs composés. Le radical métal, élément positif, se porte sur l'électrode négative ou de sortie du courant appelée *cathode;* le radical acide, élément négatif, se rend sur l'électrode positive, l'*anode*. Les éléments ainsi libérés peuvent se dégager sous forme de gaz, se précipiter sous forme de dépôts ou réagir avec d'autres composés en solution, de sorte que les produits finaux de l'électrolyse sont parfois très complexes.

Théorie d'Arrhénius (*). — D'après Arrhénius, les électrolytes sont déjà décomposés, avant le passage du courant, en éléments distincts ou *ions*. Une solution de sulfate de cuivre (So^4Cu) contient les ions So^4 et Cu; une solution d'acide chlorhydrique (H Cl) contient les ions H et Cl; une solution de soude (Na OH) contient les ions Na et OH; une solution de ferrocyanure de potassium $(Fe\ Cy^6)K^4$ contient les ions $Fe\ Cy^6$ et K.

Cette décomposition peut d'ailleurs n'être que partielle pour des solutions de concentration moyenne, et si l'on n'arrive pas à déceler directement les propriétés spécifiques des corps ainsi isolés, cela tient à ce qu'ils prennent des propriétés physiques spéciales en passant à l'état d'ions : ils existent alors avec des affinités libres et sont chargés d'électricité. Les charges qu'ils possèdent ont des signes contraires aux électrodes vers lesquelles ils cheminent, ce qui explique qu'en arrivant sur celles-ci, ces charges soient neutralysées à chaque instant par le flux électrique de signe contraire qu'y apporte le courant

(*) A. Hollard, *La théorie des ions et l'électrolyse*. Carré et Naud, Paris.

et que les ions reprennent alors les propriétés physiques connues des éléments à l'état naissant.

Lorsqu'un électrolyte est décomposé, c'est donc parce que des molécules étaient préalablement séparées en leurs ions. Le courant ne fait que provoquer le transport des ions aux électrodes. Ceux qui se portent à l'électrode positive sont les anions, les autres les cathions.

Comme ces phénomènes se produisent d'une manière invariable, quelle que soit la nature du composé dissous, on en conclut que dans l'électrolyte, le passage du courant est lié à un transport défini de matière.

Loi de Faraday. — C'est ce que Faraday a précisé en une loi dont le mécanisme tient dans les propositions suivantes :

1° *Les poids d'électrolytes décomposés sont proportionnels aux quantités d'électricité qui ont traversé le circuit.*

Si l'on fait passer un courant de I ampères à travers une cuve électrolytique, on constate que les masses des ions déposés sur les électrodes sont proportionnelles aux temps. En appelant p le poids déposé par 1 ampère sur une électrode, le poids déposé par I ampères en t secondes sera $P = pIt = pQ$.

En considérant un circuit traversé par un courant, l'action chimique de celui-ci sera la même en tous ses points, puisqu'en tous ses points circule la même quantité d'électricité. La forme, les dimensions du vase électrolytique et des électrodes n'interviendront pas, si ce n'est au point de vue de la résistance du circuit.

En montant, par exemple, à la suite l'une de l'autre, un certain nombre de cuves électrolytiques de même composition, mais de formes diverses, et les faisant traverser par un courant, on trouvera, au bout d'un temps quelconque, des augmentations égales de poids sur les diverses électrodes.

Cette proportionnalité du poids déposé aux quantités d'électricité et, par suite, en rapportant à l'unité de temps, aux intensités, permet la mesure de ces dernières; elle est la base d'une classe de compteurs électriques.

2° *Les poids des divers électrolytes décomposés par un même courant sont proportionnels aux équivalents chimiques de ces*

électrolytes. En d'autres termes, les poids des ions déposés sur les électrodes sont proportionnels à leurs équivalents chimiques.

Le poids des corps déposés ou décomposés par l'unité de quantité d'électricité prend le nom d'équivalent électrochimique de ces corps.

Un coulomb traversant une cuve électrolytique libère 0,010 384 milligramme d'hydrogène. Si b est l'équivalent chimique d'un corps rapporté à l'hydrogène, la masse z de ce corps libéré par 1 coulomb sera $z = 0{,}010\,384\ b$ milligramme.

z est l'équivalent électrochimique du corps considéré.

Un courant de I ampères déposera en t secondes une masse $M = zIt = 0{,}010\,384\ bIt$ milligrammes.

Un ampère-heure (3 600 coulombs) libère 37 à 38 milligrammes d'hydrogène et 37 à 38 b milligrammes d'un corps donné.

Ces formules permettent de calculer le dépôt que peut fournir un courant déterminé ou, inversement, de calculer l'intensité du courant nécessaire pour produire un dépôt de masse donnée dans un temps donné.

Il faut toutefois avoir soin de tenir compte de la *valence* des corps dissociés ou composés :

3° *Dans le cas où deux corps forment entre eux des combinaisons multiples, la décomposition de celles-ci est gouvernée par l'élément négatif (métalloïde).*

Dans l'électrolyse des combinaisons PN, P^nN^m, où P est un métal et N un métalloïde, 1 coulomb dégage un équivalent électrochimique de N et des poids égaux à un équivalent électrochimique de P multiplié par 1 et $\frac{n}{m}$.

Le poids déposé par 1 coulomb prendra conséquemment pour ces combinaisons les valeurs

$$1{,}0384 \cdot 10^{-5}\,(P + N) \text{ grammes},$$

$$1{,}0384 \cdot 10^{-5}\left(\frac{n}{m}P + N\right) \text{grammes}.$$

Exemple. — Si nous introduisons en série dans un même circuit deux cuves électrolytiques contenant l'une du Na Cl

(23 de sodium monovalent unis à 35,5 de chlore monovalent, soit 58,5 comme poids moléculaire) et du $Zn\,Cl^2$ (65 de zinc bivalent unis à 2 fois 35,5 de chlore, soit $65 + 2 \times 35,5 = 136$ poids moléculaire du $Zn\,Cl^2$), au moment où 58,5 grammes de $Na\,Cl$ seront décomposés par le courant à raison de 35,5 gr. de chlore sur l'anode et 23 de sodium sur la cathode, on constatera qu'une quantité de $Zn\,Cl^2 = \frac{136}{2} = 68$ grammes sera décomposée dans la seconde cuve à raison de 35,5 gr. de chlore sur l'anode et 35,5 de zinc sur la cathode. Les équivalents électrochimiques de ces deux électrolytes sont donc respectivement égaux à 58,5 pour le $Na\,Cl$ et à 68 pour le $Zn\,Cl^2$.

Polarisation des électrodes. — Appelons E_1 la différence de potentiel appliquée aux bornes d'une cuve électrolytique, I le courant qui la traverse, R sa résistance.

Le transport des ions ne se faisant que moyennant la dépense d'une certaine énergie, on conçoit que la quantité de chaleur RI^2 dépensée par effet Joule dans le bain soit loin d'équivaloir la puissance consommée aux bornes. Abstraction faite de certains effets secondaires de contact, d'ailleurs faibles en général, on peut écrire

$$E_1 I = EI + RI^2, \quad \text{d'où} \quad I = \frac{E_1 - E}{R}.$$

On voit que l'électrolyte ou plutôt les électrodes doivent devenir le siège d'une force contre-électromotrice ou force électromotrice de polarisation E, dont on peut aisément vérifier l'existence. Les électrodes sont alors dites *polarisées*. Formons, par exemple, un circuit comprenant une source d'énergie électrique, un galvanomètre et un voltamètre constitué par un vase contenant de l'eau légèrement acidulée pour augmenter sa conductibilité. Le fond du vase est traversé par deux électrodes en platine (fig. 27), dont

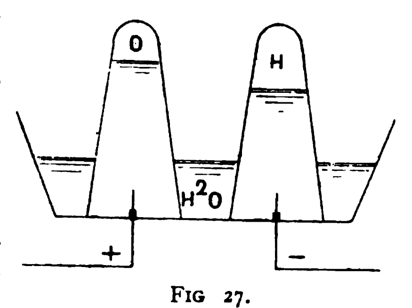


FIG 27.

on recouvre les extrémités au moyen de deux éprouvettes renversées, préalablement remplies d'eau.

Dès que le courant passe, des bulles se dégagent sur les deux électrodes : l'oxygène à l'anode, l'hydrogène à la cathode, et les deux cloches se remplissent de gaz. Le volume occupé par l'hydrogène est d'ailleurs double de celui de l'oxygène.

Les cloches étant remplies, enlevons le générateur et refermons le circuit. Nous constatons que le galvanomètre dévie en sens inverse de précédemment, c'est-à-dire que le circuit est le siège d'un courant de sens inverse au premier, provoqué par la recombinaison de l'H et de l'O des éprouvettes, qui se remplissent d'eau de nouveau. Le phénomène s'arrête quand une des électrodes est complètement recouverte de liquide.

Le voltamètre est donc transformé en un appareil produisant de l'électricité par l'intermédiaire d'une réaction chimique, c'est-à-dire en un élément de *pile*. C'est la pile à gaz de Grove. On remarquera que les pôles positifs et négatifs sont précisément l'électrode positive et négative de l'expérience précédente, c'est-à-dire que le point à haut potentiel ne varie pas dans les deux cas.

En somme, on s'en rend parfaitement compte par le fonctionnement de cet appareil, la force contre-électromotrice n'est que la manifestation de la tendance à se recombiner, qu'ont les ions mis en liberté sur les électrodes.

Cas où la polarisation ne se produit pas. — Si le passage du courant n'altère pas la composition de l'électrolyte, la polarisation ne peut se produire. C'est le cas qui se présente lorsque l'on utilise des électrodes du même métal que le sel en solution.

Par exemple, en faisant passer le courant par l'intermédiaire d'électrodes en nickel, dans une solution de nickel, ce métal vient s'appliquer en dépôt adhérent sur la cathode, tandis que le radical SO^4, se portant sur l'anode, en dissout l'exacte quantité reçue par la cathode. C'est le principe de la galvanoplastie. La cathode pourra être constituée d'un métal

quelconque qui, par l'opération précédente, se trouvera revêtu d'une couche de nickel d'autant plus épaisse que le courant aura passé plus longtemps.

La polarisation sera également évitée dans le voltamètre, si l'on absorbe au fur et à mesure de sa production l'O qui se dégage au pôle positif par un corps réducteur quelconque; la polarisation disparaît par le fait même : il restera simplement de l'H dans une des éprouvettes. On arriverait aussi au même résultat, en absorbant l'H seul par un corps oxydant.

Réversibilité des actions électrochimiques. — L'expérience de la pile à gaz de Grove, décrite plus haut, prouve la réversibilité des phénomènes électrochimiques. Elle permet de s'assurer aisément que les mêmes lois sont applicables à la combinaison comme à la dissociation des composés, en mesurant l'intensité du courant qui passe et les quantités de gaz disparaissant ou apparaissant concurremment dans les deux expériences.

Calcul de la force électromotrice de polarisation d'un électrolyte. — Par l'application du principe de la conservation de l'énergie, on peut calculer, dans chaque cas, la valeur de la force électromotrice de polarisation, d'après la quantité de chaleur que le métal libéré dégage, lorsqu'il se recombine pour former le composé de l'électrolyte primitif. Soient E la force électromotrice de polarisation en volts d'un électrolyte et Q le nombre de coulombs qui le traversent. Le travail électrochimique de décomposition aura pour valeur

$$\frac{QE}{9,81} \text{ kilogrammètres.}$$

Si z est l'équivalent électrochimique du corps libéré, le poids total déposé par Q coulombs sera Qz.

Soit W la quantité de chaleur en calories (grammes-degrés) dégagée par 1 gramme du corps libéré par l'électrolyse, pour passer à l'état de la combinaison chimique de l'électrolyte, la chaleur dégagée par le poids Qz du métal sera

égale à QzW ; et comme l'équivalent mécanique de la chaleur est 0,425 kilogrammètre par calorie (gramme-degré), la chaleur dégagée exprimée en kilogrammètres aura pour valeur 0,425 QzW.

Cette chaleur doit correspondre à celle écrite plus haut, de sorte que l'on a

$$\frac{QE}{9,81} = 0,425\ QzW, \quad \text{d'où} \quad E = 4,17\ zW.$$

Mais $z = 1,0384 \cdot 10^{-5}\ b$ grammes, comme nous l'avons indiqué plus haut, donc

$$E = 4,17 \cdot 1,0384 \cdot 10^{-5}\ bW = 0,000\ 043\ 4\ bW.$$

Enfin bW est la chaleur dégagée par ***un équivalent chimique exprimé en grammes*** du corps. Nous l'indiquerons par W_b et il viendra :

$$E = 0,0434\ W_b\ 10^{-3}\ \text{volts}.$$

Si la chaleur développée par l'équivalent en grammes est exprimée en calories kilogrammes-degrés,

$$E = 0,0434\ W_b\ \text{volts}.$$

Lorsque l'électrolyte est le siège d'une seconde réaction ***exothermique***, celle-ci agit dans le même sens que le courant et diminue la force électromotrice nécessaire pour la décomposition qui devient

$$E' = 0,0434\ (W_b - W'_b)\ \text{volts},$$

W'_b se rapportant à la seconde réaction.

REMARQUE. — Ces formules, données par lord Kelvin, ne fournissent des chiffres exacts que pour quelques électrolytes. Généralement, les résultats du calcul sont supérieurs à ceux que l'on trouve expérimentalement. Helmholz a établi qu'il y a lieu d'ajouter un terme correctif $T\frac{dE}{dT}$, T étant la température absolue de l'électrolyte et dE la variation positive ou négative de force électromotrice, correspondant à une variation élémentaire dT. Ce terme correctif paraît correspondre aux effets Peltier se produisant au contact des métaux avec

le liquide des solutions, effets qui ajoutent ou retranchent de l'énergie calorifique à l'électrolyte, suivant le sens du courant. La formule exacte est donc

$$E = 0{,}043\ W_b + T\,\frac{dE}{dT}\cdot$$

Quoi qu'il en soit, nous nous en tiendrons à la formule de Kelvin dans les calculs qui suivent, mais en ne la considérant que comme une première approximation.

Applications. — I. *Calculer la force électromotrice de décomposition de l'eau.*

On trouve dans les tables, que 2 grammes d'H se combinant avec 16 d'O, dégagent 68,36 calories (kg-degrés). Donc l'équivalent, 1 gramme d'H dégagera 34,18 et la force électromotrice de décomposition minimum sera

$$E = 0{,}0434\ .\ 34{,}18 = 1{,}48\ V.$$

II. *Quelle est la quantité d'électricité nécessaire pour décomposer 10 grammes de chlorure de sodium?*

L'équivalent chimique du chlorure de sodium est $23 + 35{,}46 = 58{,}46$. Un coulomb décomposera un poids $1{,}0384\ .\ 58{,}46\ .\ 10^{-5} = 0{,}0006$ gramme, et pour décomposer 10 grammes, il faudra

$$\frac{10}{0{,}0006} = 16\,667 \text{ coulombs ou } \frac{16\,667}{3\,600} = 4{,}63 \text{ ampères-heures.}$$

CHAPITRE V

PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES

D'une manière générale, l'élément hydro-électrique ou voltaïque est un générateur produisant de l'électricité par l'intermédiaire d'une réaction chimique ou, plus exactement, transformant l'énergie thermique de réactions chimiques en énergie électrique. La pile à gaz de Grove en est un exemple. Lorsqu'un tel élément débite sur une résistance constante, on remarque souvent que la force électromotrice monte ou a une tendance à monter pendant les premiers moments du passage du courant, pour retomber bientôt à une valeur moindre qui se maintient à peu près constante pendant plus ou moins longtemps. La poussée du début porte le nom de *coup de fouet.*

La force électromotrice fournie par la pile sera d'autant plus constante que la dépolarisation se trouve mieux assurée. Le choix du dépolarisant est donc très important; il constitue d'ailleurs la caractéristique de la plupart des éléments; aussi est-il naturel de les classer d'après la nature de ce constituant essentiel. On distingue donc les piles sans dépolarisant et celles à dépolarisants solide ou liquide, ces dernières admettant deux subdivisions : les piles à un ou à deux liquides.

Piles sans dépolarisant. — PILE DE VOLTA. — C'est la plus ancienne et la plus simple. Elle se compose d'un vase rempli d'eau acidulée au $\frac{1}{10}$ d'acide sulfurique, dans laquelle plongent deux lames métalliques, l'une en zinc, pôle négatif, l'autre en cuivre, pôle positif. Dès que l'on ferme le circuit, l'eau acidulée est électrolysée : l'hydrogène se porte sur le cuivre, l'oxygène vient oxyder la lame de zinc qui se dissout à l'état de sulfate dans l'acide sulfurique.

Les deux équations sont

$$Zn + H^2O = Zn\,O + H^2 \uparrow,$$
$$Zn\,O + H^2So^4 = Zn\,So^4 + H^2O.$$

En résumé, il y a décomposition d'un équivalent d'eau et formation d'un équivalent de sulfate de zinc.

Appliquons la formule de Kelvin :

$$E = 0{,}0434\,(W_e - W'_e) \text{ volts.}$$

La décomposition d'un équivalent d'eau en grammes absorbe 34,18 calories kilogrammes-degrés; la formation d'un équivalent de sulfate de zinc dégage 54,8 calories. D'où

$$E = 0{,}0434(54{,}8 - 34{,}18) = 0{,}89 \text{ volt.}$$

L'H produit vient s'attacher sur la plaque positive, ce qui polarise la pile et réduit la section de passage du courant.

On atténue son effet nocif en utilisant une plaque positive de grande surface rendue grenue par un dépôt électrolytique préalable de platine ou d'argent. On active le dégagement des bulles en mettant l'électrode en mouvement. De bons résultats sont aussi fournis par l'emploi du charbon de cornue ou de charbon artificiel. L'H se trouve en effet en petites bulles qui tendent à maintenir l'intégrité de leur forme sphérique; les aspérités les écartent et, se détachant, elles viennent crever à la surface du liquide.

Piles à dépolarisant solide. — ÉLÉMENT LECLANCHÉ. — C'est le type d'une importante catégorie d'éléments convenant particulièrement pour les applications ne demandant qu'un courant faible et intermittent, telles que sonneries, télégraphes, téléphones.

L'élément Leclanché primitif se compose d'un bocal en verre contenant une solution saturée de chlorure ammonique dans l'eau et un bâton ou cylindre de zinc amalgamé, pôle négatif. Au centre du bocal se trouve un vase poreux rempli de charbon de cornue concassé et de bioxyde de manganèse (pyrolucite, bioxyde aiguillé du commerce) entourant un prisme de charbon, pôle positif, coiffé d'un empâtement en

plomb fondu dans lequel est fixée une borne de prise de courant. Le mélange dépolarisant est recouvert d'une couche de cire percée d'un trou pour l'évacuation des gaz.

En circuit fermé, le zinc se dissout partiellement à l'état de chlorure de zinc. L'hydrogène réduit le bioxyde de manganèse en sesquioxyde et l'ammoniaque se dégage. Ces réactions sont représentées par l'équation très discutée :

$$Zn + 2\,NH^4Cl + 2\,Mn\,O^2 = Zn\,Cl^2 + 2\,\overset{\uparrow}{H^3N} + H^2O + Mn^2O^3.$$

Des réactions secondaires donnent naissance à du chlorure double de zinc et d'ammonium et à de l'oxychlorure de zinc. Ce dernier sel, peu soluble, se forme surtout quand l'élément est inactif. Il s'attache au zinc et doit être gratté après quelque temps.

D'après M. Ditte (°), le composé qui prendrait naissance dans la pile et cristallise principalement vers la partie supérieure de l'aggloméré, répondrait à la formule $2(NH^4Cl)Zn\,O$. Le liquide inférieur serait surtout riche en chlorures simples ou doubles de zinc, tandis que la partie supérieure, beaucoup moins dense, renfermerait une forte proportion d'ammoniaque.

M. Voisenat (°°) pense que les réactions se rapprochent de la formule :

$$2\,Zn + 2\,NH^4Cl + O = 2\,NH^3Zn\,Cl + H^2O.$$

On n'est pas encore fixé sur le rôle exact du bioxyde de Mn. D'après les recherches de M. Obak (°°°), la moitié seulement de l'oxygène consommé par la pile serait fournie par le bioxyde. Il est probable que l'autre moitié est empruntée à l'air emprisonné dans le charbon et le bioxyde, et dissous dans le liquide environnant. Lorsque la pile travaille continuellement, la chute rapide de force électromotrice que l'on observe pendant les premiers jours (coup de fouet) est vrai-

(°) DITTE, *Lumière électrique*, t. XLVIII, nos 21 et 22.

(°°) VOISENAT, *Étude sur les piles* (ANNALES TÉLÉGRAPHIQUES, mai-juin 1897, p. 233).

(°°°) OBAK, *L'Électricien*, numéro du 24 octobre 1891, p. 287.

semblablement due à la disparition de la plus grande partie de cet oxygène. Après une période de repos, cette perte est partiellement recouvrée. De ses nombreuses expériences, M. Voisenat a conclu qu'il est avantageux d'employer le peroxyde en poudre bien tassée.

Le vase, de 15 centimètres de hauteur, est de forme quadrangulaire ou ronde. Il est bon d'enduire ses bords supérieurs de paraffine ou plus simplement de savon mou, pour arrêter les sels grimpants.

En circuit ouvert les réactions sont à peu près nulles.

La force électromotrice de l'élément est 1,48 volt, sa résistance intérieure atteint souvent 10 ohms. Elle est principalement due à la présence de la cloison poreuse qui, d'autre part, s'obstrue et devient imperméable à la longue. On s'est donc ingénié à la supprimer.

Leclanché a agglomérés. — Le vase poreux et le mélange dépolarisant sont remplacés par deux plaques agglomérées A (fig. 28) juxtaposées au charbon E. Un bâton de zinc séparé par un blochet B, de bois, est réuni aux plaques A, E, A, au moyen de jarretières en caoutchouc *bb, bb*. La lame de charbon se termine à la partie supérieure par une garniture en plomb munie d'une borne de prise de courant. La partie supérieure de la lame, ainsi que la tête en plomb, sont noyées dans un mélange de cire et de paraffine destiné à remplir les pores et arrêter les sels grimpants qui pourraient attaquer le métal et compromettre la communication électrique. Enfin, pour protéger plus complètement le plomb contre les actions extérieures, on l'enduit d'un mélange de résine et de goudron.

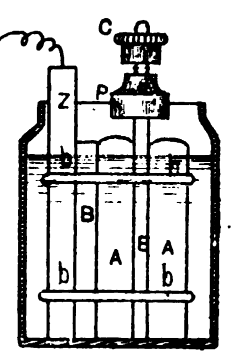


Fig. 28.

Les plaques agglomérées sont formées d'une pâte composée de 42 parties de bioxyde de manganèse, 52 de charbon de cornue granuleux, 6 de gomme laque, comprimée à 300 atmosphères à la température de 100° centigrades.

Élément Leclanché-Barbier. — Variante du précédent. Le zinc est maintenu dans l'axe du bocal. Concentriquement se trouve un cylindre creux formé par l'agglomération de graphite et de bioxyde de manganèse pulvérisés. Ces matières sont mélangées avec du brai et un peu de soufre, puis moulées à la forme voulue, sous pression, et soumises à une température de 350°. Le produit ainsi obtenu est solide en même temps que poreux, ce qui facilite l'action dépolarisante.

Élément Warnon. — Autre variante beaucoup utilisée en Belgique pour la télégraphie (fig. 29). Le vase poreux est remplacé par un sac de forte toile à fond de bois rempli du mélange dépolarisant. Des blochets en bois l'isolent du zinc Z.

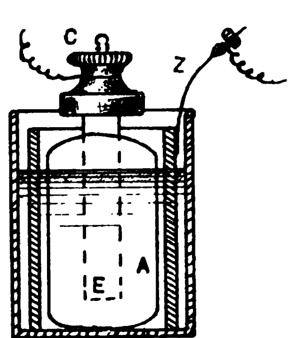


Fig. 29.

Un grand inconvénient des éléments hydro-électriques réside dans l'évaporation plus ou moins rapide du liquide, imposant un entretien fréquent. La tendance actuelle est de transformer les éléments du genre Leclanché, qui s'y prêtent particulièrement bien, en éléments dits *secs*.

Élément Moorthamers. — Il est constitué par un cylindre de charbon muni d'un borne prise de courant, entouré de bioxyde de manganèse en poudre enfermé dans un linge, sur lequel est plaqué du plâtre imprégné de chlorure ammonique. Le tout est enfermé dans un vase cylindrique en zinc formant l'électrode négative et pourvu à cet effet d'une borne de prise de courant. Le dessus du cylindre est fermé par une couche de cire dans laquelle on a ménagé, pour l'évacuation des gaz engendrés, deux conduits capillaires formés par deux petits bouts de jonc calciné.

Les dimensions sont : diamètre 8 centimètres, hauteur 16,5 centimètres.

La force électromotrice est de 1,54 volt pouvant aller à 1,58. La résistance intérieure n'atteint en moyenne que 0,28 O.

Élément de Lalande et Chaperon. — Un des modèles comprend un bocal rempli, jusqu'à 4 centimètres environ du bord, d'une solution de potasse caustique à 30 ou 40 %. Le fond porte un cylindre de tôle A (fig. 30) contenant le mélange dépolarisant qui est ici de l'oxyde de cuivre.

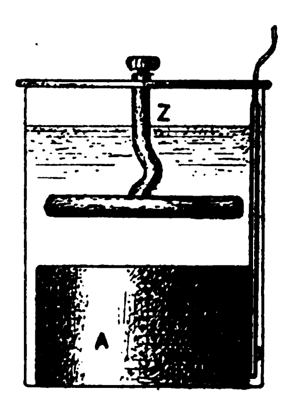


Fig. 30.

Une tige de zinc Z contournée en spirale pour présenter une grande surface sous un petit volume, attachée au couvercle en ardoise fermant le vase, plonge sa partie spiraloïde dans la solution potassique. Une borne fixée à l'extrémité de cette tige constitue le pôle —; le pôle + est fourni par une tige de cuivre recouverte de caoutchouc à la traversée du vase et rivée au cylindre du fond.

On verse au-dessus de la solution potassique une couche de pétrole brut ou de paraffine fondue, pour éviter l'attaque de la potasse par l'acide carbonique de l'air.

Dans certains modèles récents, le zinc affecte la forme d'un demi-cylindre, tandis que le cylindre à oxyde de cuivre est suspendu *en face de lui* dans le liquide.

L'action chimique est nulle à circuit ouvert. En circuit fermé, l'eau est électrolysée; l'oxygène se portant à l'anode forme de l'oxyde de zinc qui se dissout à l'état de zincate de potasse. L'hydrogène dégagé à la cathode réduit l'oxyde de cuivre en cuivre métallique.

Ces réactions répondent à la formule :

$$Zn + 2\,KOH + Cu\,O = K^2O^2Zn + H^2O + Cu.$$

La force électromotrice est de 0,8 à 0,9 volt; la résistance intérieure 0,15 ohm.

La manipulation des piles à la potasse exige certaines précautions, la potasse produisant sur la peau une impression

de brûlure et détériorant les vêtements. On guérit la lésion produite en lavant la partie attaquée avec une solution de chlorhydrate d'ammoniaque ou plus simplement d'eau pure, puis d'eau vinaigrée.

Piles à dépolarisant liquide et à un seul liquide. — Les éléments de cette classe mettent à contribution comme liquide dépolarisant de l'acide chromique, soit ajouté directement à la solution excitatrice, soit produit par la réaction de l'acide sulfurique de celle-ci sur du bichromate de potasse ou de soude.

On a

$$3Zn + Cr^2K^2O^7 + 7H^2So^4 = 3ZnSo^4 + 7H^2O + Cr^2(So^4)^3, K^2So^4.$$

Les produits de la réaction sont donc du sulfate de zinc, de l'alun de chrome et de l'eau.

La force électromotrice est de 1,9 à 2 volts.

A circuit ouvert, le zinc est attaqué très énergiquement; aussi convient-il de le retirer du liquide après usage.

ÉLÉMENT GRENET. — C'est un des plus connus de cette classe. Un récipient en forme de ballon (fig. 31) porte un couvercle isolant auquel se rattachent une tige centrale de zinc et deux lames de charbon raccordées à des bornes. La tige de zinc peut coulisser de manière à être retirée du liquide.

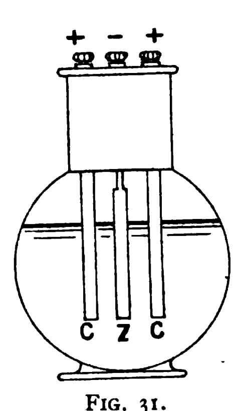


FIG. 31.

Piles à deux liquides. — ÉLÉMENT DANIELL. — Un récipient de verre contient un cylindre en zinc baignant dans de l'eau acidulée d'acide sulfurique et communiquant avec l'extérieur par une lame de cuivre rivée au zinc. Au centre du bocal en verre se trouve un vase poreux rempli d'une solution saturée de sulfate de cuivre, dans laquelle plonge un cylindre en cuivre raccordé à l'extérieur par un fil de même métal.

Lorsque la pile fonctionne, le zinc se dissout à l'état de sulfate de zinc et l'H naissant réduit le sulfate de cuivre suivant la formule

$$Zn + H^2So^4 + Cu\,So^4 = Zn\,So^4 + H^2So^4 + Cu.$$

Tout se borne à la formation d'un équivalent de sulfate de zinc et à la réduction d'un équivalent de sulfate de cuivre.

Appliquons la même équation que précédemment. La décomposition d'un équivalent de $Cu\,So^4$ absorbe 29,5 calories, de sorte que la force électromotrice calculée est égale à

$$0{,}043(54{,}8 - 29{,}5) = 1{,}09 \text{ volt.}$$

On trouve en réalité 1,07 volt.

Par suite de la réduction du $Cu\,So^4$, la solution se trouvant dans le vase poreux tend à s'appauvrir. On maintient sa concentration au moyen de cristaux de $Cu\,So^4$. Dans le modèle à ballon (fig. 32), ils sont contenus dans un ballon renversé plongeant par le col dans le vase poreux. La solution saturée étant plus dense coule au fond du vase poreux et est incessamment remplacée par la solution appauvrie.

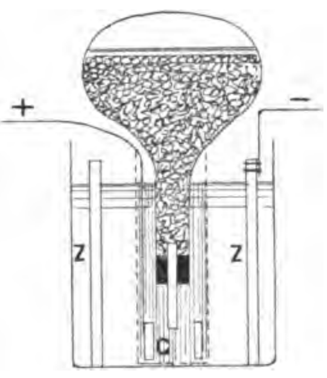


FIG. 32.

La résistance de l'élément augmente par suite de la formation de sulfate de zinc, qui a, en outre, l'inconvénient de provoquer la formation de cristaux grimpants. On doit donc renouveler le liquide extérieur de temps à autre.

A circuit ouvert, la solution cuivrique diffuse lentement à travers le vase poreux dans le liquide acide. Elle vient en contact avec le zinc, et le cuivre se précipite en dépôts boueux. Il convient donc de laisser l'élément débiter constamment.

Il faut avoir soin d'éviter que la solution acidulée ne monte jusqu'au niveau de la lame de cuivre de connexion fixée à celle de zinc, car elle serait attaquée et rapidement détruite.

Élément Gravity. — Un vase cylindrique renferme deux solutions superposées par ordre de densité : l'une inférieure, de sulfate de cuivre, l'autre de sulfate de zinc. Dans la première plongent des lames de cuivre formant une étoile à six branches entourée de cristaux de sulfate de cuivre (fig. 33) pour



Fig. 33.

maintenir la concentration de la solution; dans la seconde, un zinc amalgamé ramifié en sept branches et attaché au bocal au moyen d'un crochet ménagé dans la masse du support. Aux lames de cuivre vient se fixer un fil de cuivre recouvert de gutta-percha pour la traversée des liquides.

A circuit fermé, le zinc se transforme en sulfate de zinc; le sulfate de cuivre est réduit en cuivre.

$$Zn + H^2O + Cu\,So^4 = Zn\,So^4 + H^2O + \underset{\downarrow}{Cu}.$$

Par le travail de la pile, la solution supérieure se concentre de plus en plus. On la retire au bout d'un certain temps au moyen d'une pipette et on la remplace par de l'eau de pluie.

Quand l'élément ne fonctionne pas ou lorsqu'il est soumis à des vibrations, le sulfate de cuivre remonte en petite quantité à la partie supérieure du bocal et produit un dépôt de cuivre sur le zinc. Ce dépôt s'allonge en filaments qui finissent par réunir les pôles et mettre l'élément en court-circuit. Il est donc nécessaire de passer de temps à autre une baguette de verre sous l'électrode en zinc, de manière à en détacher les dépôts cuivreux.

La résistance intérieure est de 4 à 5 ohms.

Le montage du Gravity est quelque peu délicat. On commence par déposer les lames de cuivre et les cristaux de sulfate sur lesquels on place une feuille de papier circulaire ayant approximativement le diamètre intérieur du vase. On verse la solution cuivrique le long de la paroi en s'aidant d'un agitateur. Le papier surnage. Quand la couche de sulfate dépasse d'environ 2 centimètres les lames de cuivre, on verse légèrement sur le disque de l'eau de pluie, au moyen d'une pipette ou d'une seringue. Le papier empêche les remous et par suite le mélange de l'eau et du sulfate de cuivre. Quand l'eau parvient à quelques centimètres du bord, on retire le papier et l'on accroche le zinc.

Avant de mettre l'élément en service, il convient de réunir les deux pôles en court-circuit pendant quelques heures, pour provoquer la formation de sulfate de zinc.

Élément d'Infreville. — En Belgique, on utilise pour les éléments du genre Daniel, une modification due à M. d'Infreville, qui permet d'utiliser complètement les zincs dont les bouts donnent, dans les piles ordinaires, un déchet qui peut s'élever à 30 ou 40 °/₀.

Dans ce but, le zinc a la forme d'une étoile à douze branches (fig. 34) dans une des faces de laquelle est pratiqué un trou conique A (fig. 35), tandis que l'autre face porte un cône B de dimensions un peu moindres au sommet et plus fortes à la base que l'ouverture A.

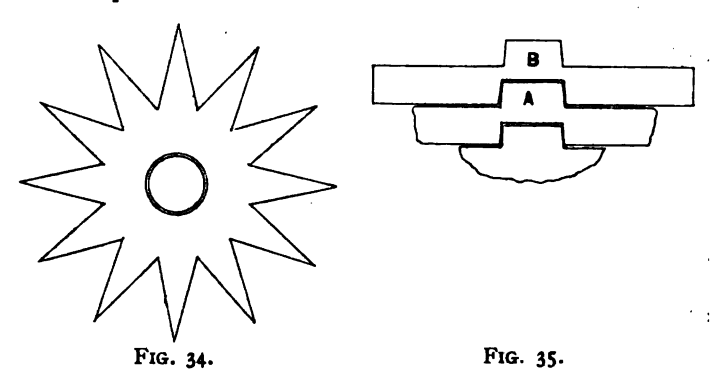


Fig. 34. Fig. 35.

Le pôle + consiste en une étoile de cuivre plongeant dans une solution de Cu So^4 saturée par des cristaux. Au-dessus, déposée avec les précautions indiquées plus haut, se trouve la solution de sulfate de zinc.

Le zinc plonge dans cette dernière solution. Il s'attache à un support en fer verni prenant appui sur le vase en verre, en engageant simplement par pression le cylindre plein, qu'il présente sur sa face supérieure, dans le trou conique du support.

Quand le zinc est presque entièrement usé, on l'enlève du support, on applique sur celui-ci un nouveau zinc et sur ce dernier l'ancien zinc (fig. 35), puis on remet le tout en place. De cette manière, l'utilisation du métal est complète.

Élément Bunsen. — Il a été beaucoup employé naguère dans les laboratoires pour la production de courants de 10 à 15 ampères pendant quelques heures, ainsi que pour les éclairages provisoires du début.

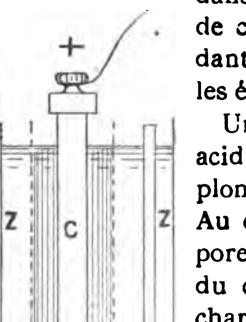


Fig. 36.

Un vase en grès contient de l'eau acidulée au vingtième, dans laquelle plonge un cylindre de zinc (fig. 36). Au centre du bocal, un vase en terre poreuse renferme de l'acide nitrique du commerce ainsi qu'un prisme de charbon C coiffé d'une borne.

A la fermeture du circuit, le zinc se transforme en sulfate et l'hydrogène libre décompose l'acide nitrique en eau et peroxyde d'azote qui se dégage sous forme de vapeurs rutilantes.

$$Zn + H^2So^4 + 2\,H\,No^3 = Zn\,So^4 + 2\,\overset{\uparrow}{No^2} + 2\,H^2O.$$

La force électromotrice est de 1,8 volt en moyenne ; elle se maintient pendant plusieurs heures, pour tomber brusquement dès que la densité de l'acide nitrique arrive à 1,26.

D'après M. d'Arsonval, il y a avantage, au point de vue de l'épuisement complet des constituants, à remplacer l'acide sulfurique par de l'acide chlorhydrique, et l'acide nitrique

par un mélange d'acides nitrique et chlorhydrique en proportions égales.

Piles étalons. — Certains éléments présentent, lorsqu'ils sont employés sous des conditions définies, une constance de force électromotrice telle qu'ils peuvent servir d'étalons.

Pour des essais sommaires, on peut prendre un élément au sulfate de cuivre fraîchement monté et admettre que sa force électromotrice est de 1,07 volt.

Pour des essais précis, on dispose de divers types d'éléments parmi lesquels un des plus employés est le *Latimer Clarck*, composé comme suit :

Pôle positif	platine dans mercure.
Pôle négatif	zinc amalgamé.
Liquide actif	Zn So^4 sursaturé.
Dépolarisant	Hg^2So^4 en pâte autour du platine.

Il faut un montage soigné, des constituants très purs et appliquer rigoureusement les prescriptions.

On a alors pour la force électromotrice $E = 1{,}434$ volt à 15° centigrades.

Cet élément se polarise rapidement. Il ne doit être employé qu'en circuit avec une résistance d'au moins 10 000 ohms et ne débiter que pendant le temps strictement nécessaire.

Sa force électromotrice à θ degrés est donnée par la formule

$$E_\theta = 1{,}434[1 - 0{,}000\,77(\theta - 15)] \text{ volts.}$$

Choix des constituants des piles. — Nous avons établi plus haut que la puissance utile maximum développée par un élément a pour expression

$$p_M = \frac{E^2}{4r},$$

dans laquelle E est la force électromotrice totale et r la résistance intérieure. On a donc intérêt à utiliser les substances donnant la force électromotrice la plus élevée, tout en étant de la meilleure conductibilité possible. Un autre point, dont il faut tenir compte, réside dans l'attaque à circuit ouvert.

Enfin, la valeur éventuelle des sous-produits d'une pile peut entrer en ligne de compte.

PÔLE NÉGATIF. — Le métal le plus utilisé jusqu'ici est le zinc. C'est en effet, parmi les métaux usuels, le plus positif. On pourrait employer des métaux moins chers, mais la diminution d'activité qui en résulterait ne compenserait pas la réduction de prix obtenue.

Le zinc chimiquement pur n'est pas attaqué par une solution sulfurique à circuit ouvert. On emploiera donc du zinc commercial *le plus pur possible*. Les impuretés qu'il contient agissent comme pôles positifs de couples locaux dès que la solution acidulée est en présence et produisent une attaque continue du zinc, même quand l'élément ne fonctionne pas,

On évite cet inconvénient par l'amalgamation. Elle se réalise le mieux en fondant en vase clos 96 parties de zinc avec 4 parties de mercure. On peut aussi plonger le zinc dans une solution mercurique ou le frotter avec une brosse et du mercure. Mais ces derniers procédés ne produisent qu'une amalgamation superficielle, qu'il faut renouveler au bout d'un certain temps.

Quel est exactement le rôle de l'amalgamation? Il semble que la surface du zinc subisse une transformation telle, que les bulles isolantes d'H viennent s'y attacher aisément et la recouvrent d'une couche protectrice. Si, en effet, on fait le vide au-dessus d'un élément dont le zinc amalgamé est passif, le gaz se dégage et l'attaque commence.

PÔLE POSITIF. — On le constitue au moyen d'un corps conducteur non attaqué par les réactifs, ayant la plus grande surface possible pour réduire la résistance intérieure et faciliter éventuellement le dégagement des gaz naissants.

On emploie dans les petits éléments spéciaux une lame métallique revêtue d'une mince couche d'un métal inattaquable par les réactifs.

En général, on recourt au charbon de cornue taillé en parallélipipèdes allongés ou, beaucoup plus fréquemment, actuellement, au charbon artificiel moulé sous pression.

CLOISONS ET RÉCIPIENTS POREUX. — On utilise principale-

ment la porcelaine dégourdie, dont on fixe le degré de porosité par la lenteur avec laquelle l'eau pure la traverse. On rencontre aussi des vases poreux en charbon artificiel qui servent de pôle positif, tout en renfermant le dépolarisant.

Coût de l'énergie fournie par les piles hydro-électriques. — Prenons, pour simplifier, n éléments de force électromotrice E montés en tension et débitant le courant I. La force électromotrice totale est nE. En appelant z l'équivalent électrochimique d'un des corps réagissants, le poids de ce corps mis en liberté dans chaque élément est Iz et pour les n éléments

$$P = nIz \text{ par seconde.}$$

La puissance de la pile

$$nEI = \frac{nEP}{nz} = \frac{EP}{z}.$$

Pour déterminer la consommation correspondant à la puissance d'un cheval, il suffira d'écrire que l'expression précédente vaut 736 watts, soit

$$\frac{EP}{z} = 736, \quad \text{d'où} \quad P = \frac{736z}{E}.$$

Pour l'hydrogène $z = 1{,}0384 \cdot 10^{-5}$ grammes, d'où

$$P = \frac{736 \cdot 1{,}0384}{E \cdot 10^5} \text{ grammes par seconde.}$$

Par heure, la dépense sera 3 600 fois plus grande, soit

$$\frac{27{,}42}{E} \text{ grammes d'H.}$$

Les autres corps donneront des dépenses proportionnelles à leur équivalent chimique b, soit

$$\frac{27{,}42}{E}\, b.$$

Pour l'élément Bunsen, par exemple, on obtient les dépenses suivantes en admettant une force électromotrice moyenne de 1,8 volt.

CORPS	ÉQUIVALENTS	POIDS ENGAGÉS en kilogrammes
Zinc	32,45	0,495
H^2So^4	48,91	0,745
$H\,No^3$	62,88	0,958

En comptant le zinc à fr 0,50 le kilogramme, l'H^2So^4 à fr 0,10 et l'$H\,No^3$ à fr 0,60, on arrive au prix total de fr 0,898 par cheval-heure total.

Mais la main-d'œuvre de montage et de nettoyage de la pile est onéreuse et les déchets sont considérables. En estimant ces derniers à 0,4 seulement, ce qui est trop faible, et admettant un rendement électrique de 0,7, le prix ci-dessus devient

$$\frac{0{,}898}{0{,}6\,.\,0{,}7} = \text{fr } 2{,}14.$$

On dépasserait largement 3 francs, en faisant entrer en ligne de compte le coût de la main-d'œuvre. Les autres éléments hydro-électriques fourniraient des chiffres analogues.

Ces résultats sont excessifs, si on les rapproche de ceux obtenus avec les machines. Par exemple, à Bruxelles, grâce au bas prix du charbon qui peut revenir de fr 0,009 à fr 0,016 le kilogramme, l'hectowatt-heure est vendu fr 0,04 par la ville, ce qui représente pour le cheval-heure fr 0,295.

Conclusions. — Les piles hydro électriques trouvent surtout leur emploi dans les applications domestiques ou de laboratoire pour la production de courants faibles et, en général, intermittents.

CHAPITRE VI

LES DYNAMOS

Les machines productrices de courant comportent deux parties essentielles : l'*inducteur* et l'*induit*.

L'*inducteur* a pour objet de développer un ou des champs magnétiques que les conducteurs de l'*induit* traversent, en devenant ainsi le siège de forces électromotrices d'induction.

Il peut être constitué par un aimant permanent et la machine est dite magnéto-électrique ou simplement magnéto, ou par un électro-aimant et alors la machine est une dynamo.

Le nom de dynamo est plus spécialement réservé aux machines à courant continu.

§ 1. — ENROULEMENT DES INDUITS.

Induit bipolaire à anneau. — Supposons un champ magnétique NS (fig. 37) dans lequel tourne, suivant la direction indiquée par la flèche, un induit Gramme composé d'un tore en fil de fer isolé, sur lequel est enroulé un conducteur en cuivre recouvert d'un guipage isolant.

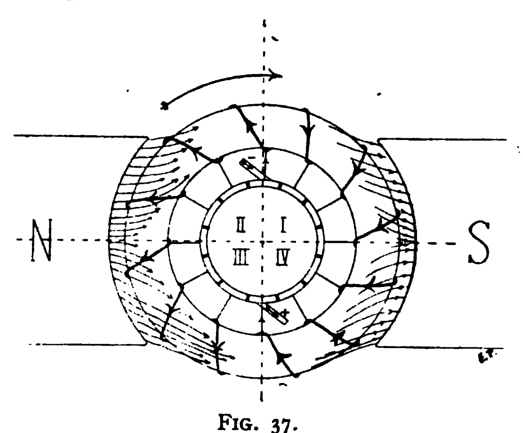


FIG. 37.

Par suite de la perméabilité élevée du fer, le flux $\mathfrak{N}$ issu des inducteurs va bifurquer également entre les deux moitiés de l'induit, l'air environnant n'étant traversé que par un nombre de lignes de force beaucoup moindre, vu sa grande réluctance.

Les spires formées par le fil sont, à cause de la variation de l'inclinaison de leur plan sur la direction des deux champs partiels, traversées par des flux de force différents.

Si nous considérons les spires du premier quadrant, nous voyons que le flux qu'elles embrassent va en diminuant. Donc la force électromotrice engendrée est positive. Sa direction est indiquée par les flèches.

Dans le deuxième quadrant, le flux va en augmentant, la force électromotrice est négative.

Dans le troisième quadrant, le flux diminue, donc la force électromotrice est positive, c'est-à-dire en ayant soin de se tourner dans la direction du champ et appliquant la règle de Maxwell, de même sens que dans le quadrant précédent, tandis que dans le quatrième quadrant, elle est orientée comme dans le premier.

En résumé, pendant la rotation de l'induit, ses spires se partagent en deux groupes égaux, symétriques par rapport à la droite perpendiculaire à la ligne des pôles appelée *ligne neutre*, et sièges de forces électromotrices égales et de directions opposées.

Il s'agit maintenant de les utiliser pour la production d'un courant.

A cette fin, chaque spire ou chaque groupe de spires, en supposant celles-ci partagées en un certain nombre de groupes égaux, dénommés sections, est connectée à une lame d'un collecteur constitué par des lames en cuivre (fig. 38), isolées l'une de l'autre le plus souvent au moyen de mica et affectant dans leur ensemble la forme d'un cylindre concentrique à l'axe de rotation.

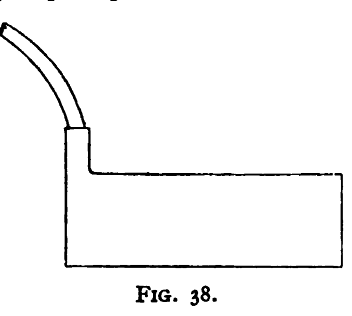


Fig. 38.

En supposant que deux balais en fils, lames ou toiles de cuivre ou en charbon, reliés à un circuit extérieur et diamétralement opposés, appuient sur le collecteur suivant la ligne neutre, nous voyons que les

deux moitiés de l'induit, sièges de deux forces électromotrices égales placées en opposition, pourront envoyer leur courant dans le circuit par l'intermédiaire des balais. Le balai supérieur, dans les conditions de la figure, sera négatif, parce que c'est par lui que le courant entre dans l'induit; l'autre sera positif, parce que le courant en sort. Si l'induit tournait en sens inverse, ce serait le contraire; le balai supérieur deviendrait + et l'autre —.

Pour éviter des interruptions du circuit, la surface frottante des balais doit être plus large que la séparation isolante de deux lames consécutives du collecteur. Il en résulte que les diverses spires de l'induit sont successivement mises *en court-circuit* par les balais.

Si le nombre des lames du collecteur est suffisamment grand, au moment où une spire échappe au balai supérieur, une autre entre sous le balai inférieur, de sorte que, le nombre de sections induites restant le même de part et d'autre, la force électromotrice de la machine demeure pratiquement constante.

Diagramme des potentiels au collecteur. Procédé Mordey. — On voit immédiatement que le potentiel doit croître symétriquement de lame en lame du collecteur. de part et d'autre du balai négatif, jusqu'au balai positif.

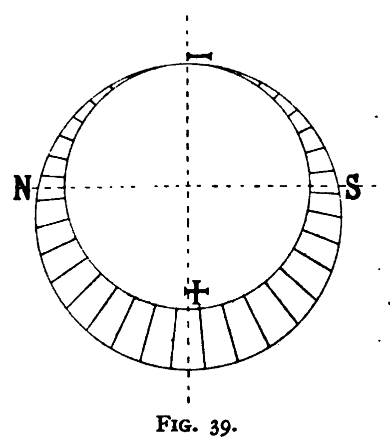


FIG. 39.

Si, suivant le procédé dû à l'électricien Mordey, le premier est mis en connexion avec un voltmètre dont la seconde borne communique avec un petit balai auxiliaire auquel on fait successivement parcourir toutes les touches du collecteur en partant du balai négatif, et que l'on porte des longueurs proportionnelles aux voltages lus, sur le pro-

6

longement des rayons correspondant aux touches, on obtiendra le diagramme polaire, figure 39, qui, par développement de la circonférence extérieure du collecteur suivant une droite, se transforme comme l'indique la figure 40.

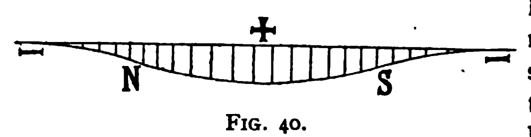


Fig. 40.

L'élément de force électromotrice fourni par chaque section de l'induit est donné par la différence entre les ordonnées relatives aux deux lames consécutives du collecteur reliées aux extrémités de la section considérée. Cette différence est maximum aux deux points d'inflexion de la courbe, qui correspondent aux bobines passant dans la ligne des pôles. C'est là, en effet, que la variation du flux embrassé par les spires est la plus grande.

Aux extrémités de la ligne neutre, où la courbe présente respectivement un maximum et un minimum, l'accroissement d'ordonnée est nul. La mise en court-circuit des spires situées aux environs de la ligne neutre n'a donc aucune influence au point de vue de la valeur de la force électromotrice fournie par la machine.

On peut employer utilement la méthode de M. Mordey pour vérifier la symétrie du champ magnétique dans lequel se meut l'induit. Un défaut organique ou d'homogénéité est immédiatement accusé par une déformation de la courbe des potentiels.

Remarque I. — Si l'on considère une spire en particulier, on voit que, vis-à-vis d'un pôle, la force électromotrice engendrée est maximum; elle est nulle dans la position rectangulaire suivante; change de sens et acquiert la même valeur absolue que précédemment en face du pôle suivant, pour revenir à zéro 90° plus loin. La spire supposée seule et fermée sur elle-même serait parcourue par un courant alternatif présentant une oscillation complète par tour de l'induit. La vitesse angulaire de sa force électromotrice serait égale à celle de l'induit. La fréquence du courant ou, comme nous le verrons plus loin, le nombre d'oscillations complètes du courant par seconde, serait égale au nombre de tours par seconde de l'induit.

II. — La force électromotrice continue recueillie aux balais est donc, de part et d'autre de ceux-ci, égale à la somme des forces électromotrices alternatives engendrées dans les spires de chaque moitié de l'induit.

III. — Si nous appliquons à l'ensemble : inducteur, balais, induit, une vitesse angulaire égale et contraire à celle de l'induit, rien ne sera changé au point de vue des phénomènes d'induction ; l'induit restera fixe dans l'espace, tandis que les inducteurs et les balais tourneront en sens inverse, avec la vitesse angulaire primitive. Donc, *on peut obtenir une force électromotrice continue d'un enroulement induit fixe, que traverse avec une vitesse uniforme un champ constant, à condition que les balais se déplacent dans le même sens et avec la même vitesse que le champ.*

Suppression des étincelles sous les balais. — En fermant le circuit extérieur compris entre les balais, l'induit se trouve divisé en deux moitiés parcourues par des courants égaux et inverses. Si les balais se trouvent exactement sur la ligne neutre, ou en deçà par rapport au sens de la rotation de l'induit, leurs extrémités frottant sur le collecteur seront le siège d'étincelles extrêmement nuisibles pour leur bonne conservation.

FIG. 41

Afin de rendre plus claires les explications qui vont suivre, nous omettrons le collecteur, en supposant le courant capté par

les balais frottant directement sur les fils à la partie extérieure de l'anneau, dispositif qui a d'ailleurs été réalisé jadis dans certaines machines de la maison Siemens notamment.

Considérons donc une spire A, B, C (fig. 41), en ce moment mise en court-circuit et dans laquelle le courant va, par conconséquent, s'éteindre. Un instant après, elle sera parcourue par un courant de sens inverse. Ce renversement du courant est extrêmement rapide. Si l'induit fait 1 000 tours par minute et s'il existe 100 touches au collecteur, la durée du court-circuit est très inférieure à $\frac{1}{1665}$e de seconde.

La spire possédant un coefficient de *selfinduction* $\mathcal{L}$ et étant pendant le court-circuit parcourue par un courant décroissant, va, en vertu de la formule générale $e_s = -\mathcal{L}\frac{di}{dt}$, se trouver le siège d'une force électromotrice d'induction $+\mathcal{L}\frac{di}{dt}$, puisque *di* est négatif, c'est-à-dire le siège d'une force électromotrice de même sens que le courant finissant, donc de sens inverse à celui qui va devoir la traverser.

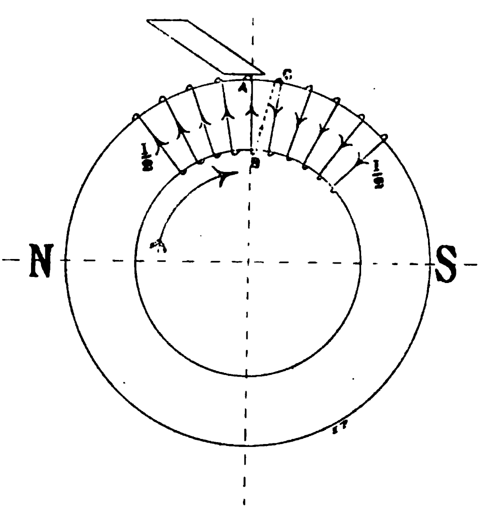


Fig. 42.

Il en résulte qu'au moment où la partie C de la spire, emportée par le mouvement de rotation de l'induit, lâche le balai (fig. 42), le courant d'intensité $\frac{I}{2}$ de la moitié droite de l'induit, rencontrant une force électromotrice inverse dans le fil ABC, se continue dans l'air sous forme d'étincelle jaillissant entre C et le balai.

Décalage des balais. — Que faut-il faire pour empêcher la production de ce phénomène? Simplement avancer les

balais dans le sens de la rotation de l'induit, jusqu'à amener la spire en commutation dans la seconde moitié du champ, dans la position voulue pour que la force électromotrice inverse qui y est induite soit telle, que non seulement elle annihile celle donnant naissance à l'extra-courant, mais encore qu'elle développe dans la spire le courant $\frac{I}{2}$ avec le sens qu'il a dans la seconde moitié de l'induit. Ce courant ayant le sens et l'intensité de celui passant dans la seconde moitié de l'induit, il n'y aura naturellement plus production d'étincelles au moment où C quittera le balai, puisque l'écoulement de l'électricité se fera sans choc ou modification quelconque, la spire étant déjà parcourue par le courant voulu, avant la séparation du balai.

Le déplacement simultané des deux balais s'obtient aisément. Ils sont, à cet effet, fixés sur des bras faisant corps avec un collier isolant, tournant sur le palier adjacent au collecteur. Le collier peut être déplacé au moyen d'une poignée, ou d'un volant dans les grandes machines, et on peut le caler définitivement au moyen d'une vis, quand la position convenable est obtenue.

Influence de la selfinductance des spires. — Plus la *selfinductance* de la spire sera importante, plus la force électromotrice $-\mathcal{L}\frac{di}{dt}$ qui en résulte sera grande, et plus il faudra avancer les balais pour trouver le point de bonne commutation où il n'y aura plus d'étincelles.

Le coefficient de selfinduction dépend, comme nous l'avons vu, du nombre de spires et de l'état du noyau de fer de la bobine. Plus ce noyau est saturé, moins est grande la perméabilité et, par conséquent, plus le coefficient de selfinduction est réduit. Il y a donc avantage à employer des noyaux saturés et des sections présentant de faibles nombres de spires.

Réaction d'induit. — Nous allons maintenant étudier quelle influence le décalage des balais exerce sur le fonctionnement général de la machine.

Soit AB (fig. 43) la droite de commutation, A'B' la droite symétrique par rapport à la ligne neutre. Ces droites divisent les spires en deux groupes bien distincts :

1° Celles comprises dans les angles AoA' et BoB' développent des champs magnétiques en opposition avec le champ inducteur. Ce sont des *spires antagonistes*, dont l'effet est de réduire le champ inducteur, donc diminuer la force électromotrice développée par la machine;

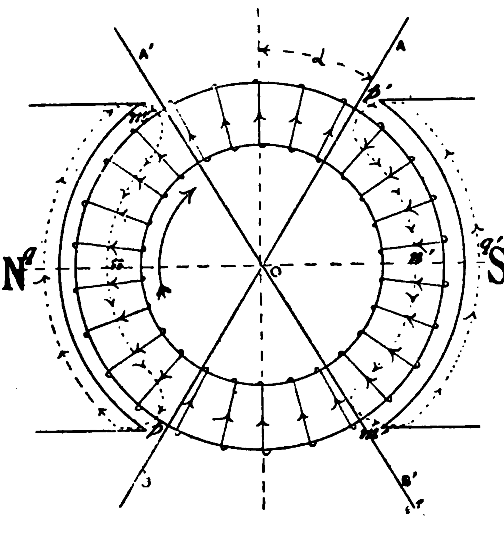


FIG. 43.

2° Les spires comprises dans les angles A'oB, AoB', qui n'exercent aucun effet réducteur sur le champ principal engendré par les inducteurs. Mais elles développent des champs *transversaux*, dont les lignes de force suivent les trajets *mnpq*, *p'n'm'q'*, indiqués en pointillé. En *m*, de même qu'en *m'*, le champ transversal s'ajoute au champ inducteur; en *p* et *p'*, il s'en retranche, et la distribution du champ magnétique dans lequel se meut l'induit se trouve tout autre que ce qu'elle était à circuit ouvert. Le champ est, par *cette réaction de l'induit*, devenu dissymétrique (fig. 44). Il est renforcé sous les cornes polaires de sortie *m*, *m'* et affaibli sous les cornes d'entrée *p*, *p'*.

Il en résulte que l'on doit avancer davantage les balais, pour placer la spire commutée dans un champ suffisamment dense. D'autre part, le parcours des lignes de force se trouve allongé, ce qui majore la réluctance de leur circuit et affaiblit d'autant l'effet des inducteurs.

La position de calage des balais correspondant à la disparition des étincelles au collecteur se règle par tâtonnement. L'angle de calage nécessaire augmente naturellement, à mesure que le courant débité devient plus intense.

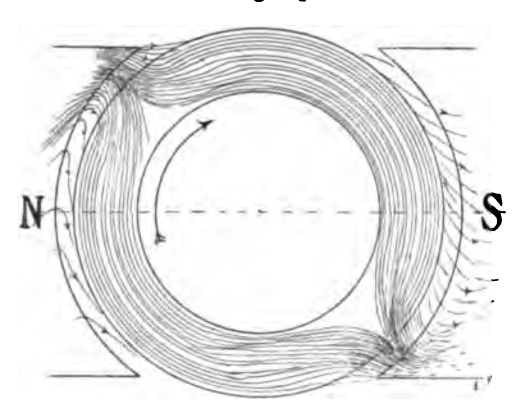


Fig. 44.

La condition de commutation sans étincelle est que le champ sous la corne polaire d'entrée ne soit pas si affaibli par le champ de réaction que l'on ne puisse trouver dans cette région un flux assez fort pour produire dans la bobine mise en court-circuit le renversement de force électromotrice nécessaire. Il y a donc, pour une machine donnée, une intensité de courant dans l'induit que l'on ne peut dépasser sans que cette condition cesse d'être satisfaite, c'est-à-dire sans qu'il se produise aux balais des étincelles irréductibles.

Calcul du flux réduit par la réaction d'armature. — Soient n le nombre total des spires de l'induit et α l'angle de calage. Le nombre de spires antagonistes est, dans chaque moitié de l'induit,

$$\frac{n}{2} \cdot \frac{2\alpha}{\pi} = \frac{n\alpha}{\pi}.$$

Il en ressort une force magnétomotrice

$$4\pi \frac{n\alpha}{\pi} \frac{I}{2}$$

appliquée à chaque moitié du circuit magnétique, soit la même force magnétomotrice pour tout le circuit (il suffit, en effet, d'une force magnétomotrice moitié moindre pour faire

passer le même flux dans un noyau de section double), et la force magnétomotrice résultante appliquée au circuit total est, en appelant *m* le nombre de spires des inducteurs et *i* le courant qui les traverse,

$$\mathcal{F}' = 4\pi\left(mi - \frac{n\alpha I}{2\pi}\right).$$

Le flux qui en résulte a pour valeur :

$$\mathcal{N}' = \frac{\mathcal{F}'}{\Sigma\mathfrak{R}},$$

$\Sigma\mathfrak{R}$ représentant la somme des résistances magnétiques du circuit suivi par le flux.

Pour obtenir le même flux $\mathcal{N}$ qu'à circuit ouvert, il sera donc nécessaire de majorer la force magnétomotrice des inducteurs, soit en enroulant plus de fil sur ceux-ci, soit en renforçant le courant qui les traverse, soit en augmentant les deux. Mais, quoi que l'on fasse, cela se traduira par une dépense supplémentaire. La réaction d'induit a donc des conséquences nuisibles; aussi convient-il de la réduire le plus possible. Nous étudierons dans la suite les moyens qu'on utilise à cet effet.

Courants de Foucault dans le noyau et dans le fil induit. — Le noyau, soumis aux mêmes influences inductrices que le fil induit, tend à être le siège de forces électromotrices de même sens que ce dernier, ce qui, si l'on n'y mettait obstacle, entraînerait un échauffement exagéré de l'induit, ayant pour corollaire une perte sensible d'énergie.

Pour y remédier, on le subdivise autant que possible, perpendiculairement au sens de la force électromotrice induite. Gramme a employé pour ses anneaux un rouleau de fil verni. Mais cette disposition augmente la réluctance, vu l'intervalle non magnétique compris entre les fils, que doit traverser le flux; aussi utilise-t-on généralement des disques en fer, empilés dans le sens de l'axe de rotation et séparés par du papier ou un vernis isolant. De la sorte, les lignes de

force restent dans le fer pendant tout leur trajet à travers le noyau.

Les conducteurs induits sont eux-mêmes le siège de courants de Foucault. Si on les considère, en effet, comme formés de filets parallèles à leur axe, puisque ceux-ci, particulièrement au voisinage des becs polaires, coupent des parties de champ inégalement intenses, il s'y développe des forces électromotrices différentes, qui se composent pour donner une force électromotrice résultante tendant à faire parcourir localement le conducteur, par un courant qui pourra être très intense, à cause de la faible résistance du circuit.

On évite cet écueil en composant les conducteurs induits de faisceaux de fils isolés les uns des autres et tordus de manière que la force électromotrice moyenne soit la même dans chaque élément. On peut aussi se contenter de les constituer au moyen de fils de cuivre nus légèrement tordus. La résistance de leurs contacts est assez grande pour s'opposer au passage d'un courant intense, vu la faiblesse des différences de potentiel mises en jeu.

L'intensité des courants de Foucault est sensiblement proportionnelle à la vitesse de rotation de la machine en vertu de la loi de l'induction. La chaleur qu'ils produisent i^2r croît donc comme le carré de cette vitesse.

Dans les bonnes machines de plus de 50 kw, on estime que la perte par courants de Foucault est de 1,5 °/₀ de leur puissance totale.

Hystérésis. — Enfin, il se développe dans le noyau, par suite de l'hystérésis, une quantité de chaleur du même ordre que celle produite par les courants de Foucault. Pendant une révolution complète, chaque molécule de fer aimantée sud en face du pôle inducteur nord, puis nord en face du pôle inducteur sud, parcourt un cycle magnétique complet, d'où perte d'énergie sous forme de chaleur. Nous avons vu précédemment l'expression de sa valeur.

Perte par effet Joule dans l'anneau. — Si n est le nombre de spires enroulées sur l'anneau et R leur résistance totale,

la résistance comprise entre les balais sera (résistance combinée de deux dérivations de $\frac{R}{2}$) :

$$R_c = \frac{1}{\sum \frac{1}{r}} = \frac{1}{2 \cdot \frac{1}{\frac{R}{2}}} = \frac{1}{2 \cdot \frac{2}{R}} = \frac{R}{4}.$$

Si I est le courant total débité par la machine, la perte par effet Joule dans l'induit sera la somme des pertes dans les deux moitiés de l'induit, soit

$$\frac{R}{2} \cdot \frac{I^2}{4} + \frac{R}{2} \cdot \frac{I^2}{4} = \frac{R}{4} I^2 = R_c I^2.$$

Donc la puissance dépensée en chaleur dans l'induit est exprimée par la résistance *comprise entre les balais* multipliée par le carré de l'intensité du courant total qui le traverse.

Exemple. — La résistance totale des spires d'un anneau bipolaire est de 1,12 ohm. L'anneau débite 25 ampères, quelle est la perte par effet Joule?

$$\frac{1,12}{4} \cdot \overline{25}^2 = 175 \text{ watts.}$$

Enroulements divers. — Le dispositif que nous venons de voir constitue l'enroulement Gramme bipolaire classique. Il présente un certain nombre de variantes. On peut enrouler non pas une couche de fil, mais deux superposées. Mais ceci est moins bon au point de vue du refroidissement de l'induit. Dans le bobinage Wodicka, deux spires diamétralement opposées sont réunies en série. Cette disposition a pour but de parer aux inégalités que pourraient présenter entre elles les deux moitiés du champ, par suite de différence de perméabilité, dispersion différente, etc

Induits multipolaires à anneau en quantité. — Prenons comme exemple la machine tétrapolaire (fig. 45), dans laquelle nous rencontrons 4 pôles successivement de noms contraires, symétriquement distribués sur la périphérie de l'anneau. Les champs se disposent comme l'indique la figure.

Appliquons la règle de Maxwell. Nous voyons que les forces

électromotrices se développent dans les spires successives suivant la direction des flèches. L'induit est subdivisé en quatre parties, égales par raison de symétrie et placées en opposition.

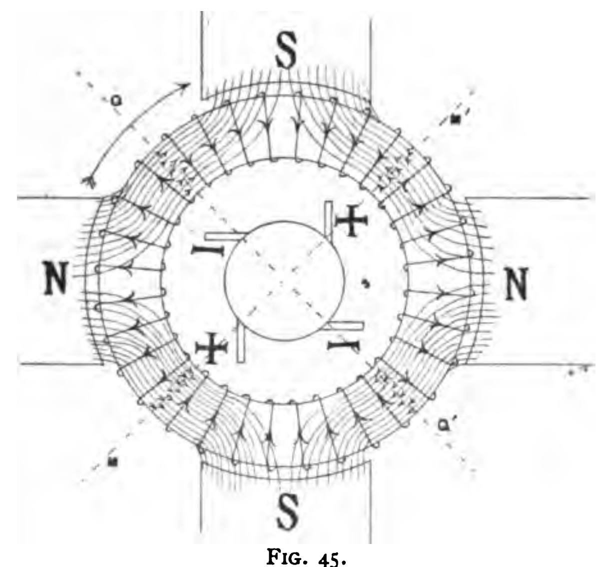


Fig. 45.

Les spires seront encore raccordées à un collecteur et, pour capter les courants qui tendent à se produire, il est aisé de voir qu'il nous faudra 4 balais placés suivant les droites de maximum et minimum de potentiel MM', QQ'. En outre, les deux balais + devront être réunis entre eux, ainsi que les deux balais —.

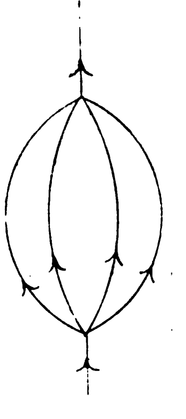


Fig. 46.

En somme, il est facile de voir que cet induit tétrapolaire correspond exactement au cas de deux induits bipolaires réunis en quantité. Si n est le nombre total de spires de l'anneau et R leur résistance totale, nous aurons 4 fois $\frac{n}{4}$ spires de résistance $\frac{R}{4}$ réunies en quantité (fig. 46). Puisque les 4 résistances sont mises

en dérivation, la résistance combinée de l'ensemble n'est que :

$$\frac{1}{\sum \frac{1}{r}} = \frac{1}{4 \cdot \frac{1}{\frac{R}{4}}} = \frac{R}{16}.$$

Reprenons l'exemple étudié précédemment. Supposons que ce soit le même anneau tournant avec la même vitesse que nous enveloppons de 4 pôles égaux à ceux de la machine bipolaire. Au lieu de $\frac{n}{2}$ spires en tension, nous n'en avons plus que $\frac{n}{4}$. Mais comme la traversée du champ se fait en deux fois moins de temps, la force électromotrice de la machine reste la même.

Si donc l'induit débite le même courant que précédemment, la chaleur qu'il dégagera par effet Joule ne sera plus que $\frac{R}{16} I^2$ au lieu de $\frac{R}{4} I^2$. Elle s'élèvera seulement au $\frac{1}{4}$ de ce qu'elle était dans la bipolaire, et nous aurons, dans ces conditions, amélioré le rendement de notre machine.

Mais on peut, ici, lui faire produire davantage. Le courant se subdivisant entre 4 circuits au lieu de 2, pourra sans inconvénient être doublé et l'énergie disponible sera doublée aussi. Avec 6 pôles elle serait triplée et ainsi de suite. Ceci montre comment on est amené aux dynamos multipolaires, quand on aborde de grandes puissances et qu'il faut réduire le plus possible l'encombrement. On y est d'ailleurs amené également par la nécessité de loger sur l'induit de très gros fils s'il s'agit de dynamos à grand débit, ou de très nombreux fils si l'on doit produire de hauts voltages.

Comme dans la machine bipolaire, la réaction d'induit oblige d'avancer les balais dans le sens de la rotation.

Ainsi disposée, la machine tétrapolaire exige 2 paires de balais. Avec 6 pôles il en faudrait 3, calées à 60° l'un de l'autre; avec 8, 4, etc. On a cherché à éviter cette multiplicité des balais.

Dispositif Mordey. — Dans le dispositif Mordey (fig. 47), on relie invariablement à l'intérieur de l'induit, les lames du

collecteur symétriquement placées par rapport aux pôles de même nom. Il n'est dès lors plus nécessaire que de deux balais fixés : à 90° si la machine est tétrapolaire ; à 60° si elle est hexapolaire, etc. Toutes ces liaisons constituent le connecteur (fig. 47).

Le dispositif Mordey présente les inconvénients d'être compliqué et d'entraîner une perte de chaleur par effet Joule dans les fils de connexion. Enfin, des conducteurs à potentiels très différents se croisent dans le connecteur, ce qui expose à des courts-circuits.

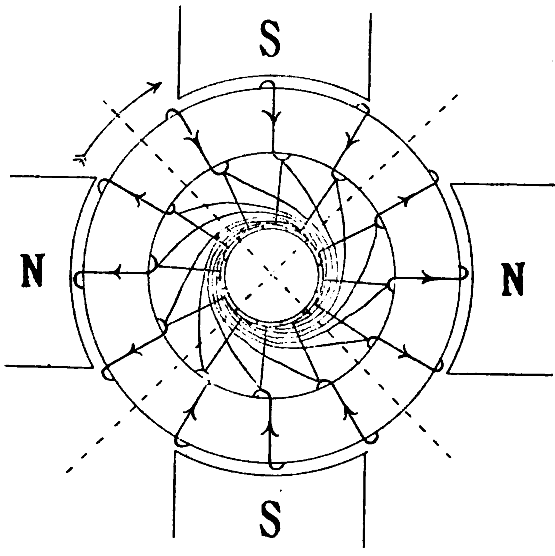


FIG. 47.

Dans les grandes dynamos enroulées en quantité, on ne considère pas l'emploi de plusieurs balais comme un inconvénient. Généralement même, on fixe deux ou trois balais côte à côte sur la même lame du collecteur, pour augmenter la surface de contact et permettre le remplacement, le nettoyage ou le réglage en marche d'un quelconque d'entre eux.

Avec les enroulements multipolaires que nous venons de voir, il est nécessaire que les flux sortant des pôles aient la

même valeur, sinon les forces électromotrices des groupes de spires concourantes ne sont pas égales et ceux à plus faible force électromotrice tendent à être traversés par un courant inverse.

Induits multipolaires à anneau en tension. — On y remédie et l'on atteint aussi plus aisément les hauts voltages, en adoptant un enroulement dans lequel les bobines sont réunies en tension, suivant deux séries couplées en parallèle, comme dans les induits bipolaires.

On arrive à ce résultat en raccordant les spires *qui doivent être en nombre impair* si la dynamo est tétrapolaire, non plus successivement, mais suivant les sommets d'un polygone régulier étoilé. Dessinons cet enroulement pour une machine tétrapolaire à 7 spires (*) (fig. 48). Divisons la circonférence extérieure en 7 parties égales; traçons les 7 spires en indiquant le sens des forces électromotrices développées dans la position qu'elles occupent. Raccordons ensuite la spire 1 à la spire $1 + 4 = 5$, la spire 5 à la spire $5 + 4 = 9 - 7 = 2$; la spire 2 à $2 + 4 = 6$; la spire 6 à $6 + 4 = 10 - 7 = 3$, etc. Nous voyons que l'induit se trouve effectivement subdivisé en deux séries montées en dérivation l'une par

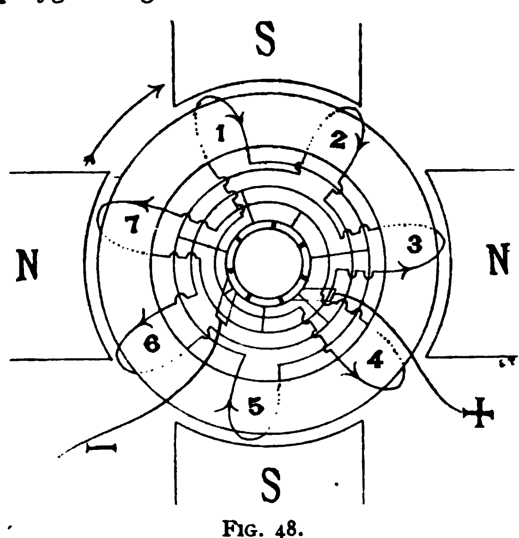


FIG. 48.

(*) Nous avons adopté ce faible nombre de spires qui, en pratique, ne se rencontre pas, afin de permettre de suivre aisément les connexions d'un bout à l'autre de l'induit.

rapport à l'autre et comprenant, la première, les spires 1, 5, 2; la seconde, les spires 4, 7, 3, 6. Les deux balais sont calés à angle droit. Par raison de symétrie, quand l'un touche une seule lame, l'autre en touche deux, c'est-à-dire établit deux spires en court-circuit. Mais, à condition que le nombre de spires soit suffisamment élevé, la différence d'une spire entre les enroulements situés de part et d'autre des balais n'a pas d'importance pratique.

Induits bipolaires à tambour. — Si, au lieu de la règle de Maxwell, on applique aux conducteurs d'une spire la règle de Faraday, on constate aisément que seuls les conducteurs externes (fig. 49) jouent un rôle utile au point de vue de la production de la force électromotrice. Le flux entre, en effet, dans le noyau par sa surface extérieure. Il en sort de même, et une très faible partie traverse l'espace d'air intérieur de l'induit.

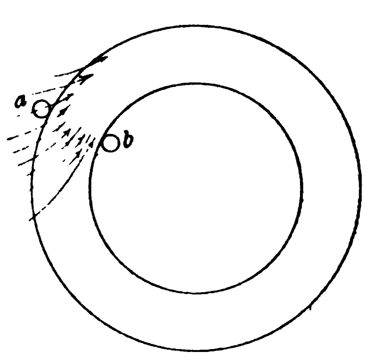


FIG. 49.

Les deux conducteurs, *a* supérieur et *b* inférieur de la spire (fig. 50), sont donc le siège de forces électromotrices de même sens, venant en déduction l'une de l'autre dans la boucle. Les conducteurs rayonnants *c* et *d* ne sont le siège d'aucune force électromotrice, vu qu'ils ne coupent pas de lignes de force.

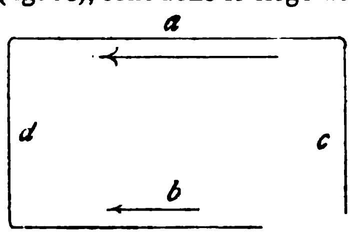


FIG. 50.

Il résulte des considérations précédentes que le conducteur *b* est doublement nuisible en raison 1° de la force contre-électromotrice qu'il développe et 2° de sa résistance provoquant une perte d'énergie par effet Joule.

C'est pour éviter ces inconvénients que l'on imagina l'enroulement à tambour constitué comme suit : Le noyau monté sur l'axe a la forme d'un cylindre allongé formé par des rondelles en fer isolées et enfilées sur l'arbre de la machine. Il se termine par des rondelles isolantes portant en saillie des expansions destinées à classer les fils. Ceux-ci, enroulés suivant les génératrices du cylindre, se raccordent à un collecteur du même genre que celui de l'anneau Gramme. Prenons le conducteur *a* (fig. 51) raccordé à la lame A du collecteur. Il passe à l'extrémité droite du cylindre, de manière à suivre la génératrice diamétralement opposée et revenir en *b*. Le tambour tourne entre les deux expansions polaires. Donc, lorsque *a* coupe le champ dans un sens, *b* le coupe en sens contraire, c'est-à-dire que les forces électromotrices développées sont de sens inverse et s'ajoutent dans la spire. Raccordons *b* à la lame suivante B du collecteur, ou enroulons plusieurs spires avant de le raccorder. De là, nous partirons avec une nouvelle spire ou groupe de spires, et ainsi de suite. Si nous avons passé le fil une fois dans les intervalles consécutifs ménagés entre les saillies, il est clair que le tambour sera partiellement recouvert de fil sur toute sa circonférence, alors que la moitié seulement des lames du collecteur seront raccordées. Pour relier la seconde moitié de celles-ci, on posera une nouvelle couche de fil soit superposée à la première, soit adjacente, si l'on a eu soin de ménager à côté de chaque conducteur un espace disponible.

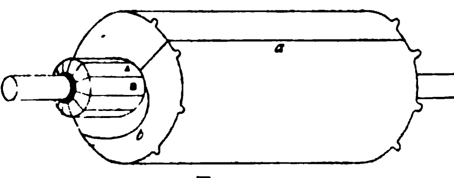


FIG. 51.

Il est facile de voir que pour un même volume, le nombre de spires d'un tambour est la moitié de celui d'un anneau de mêmes dimensions soumis à la même induction et donnant la même force électromotrice.

Les fils des bases du tambour contournent l'arbre et se superposent en formant deux calottes paraboliques, que l'on

évite dans les fortes machines, en prolongeant les conducteurs longitudinaux et en les raccordant au moyen de lames courbes, disposées dans des plans parallèles aux faces du tambour. Il est nécessaire d'enrouler, autour de la partie cylindrique, des frettes formées de fil d'acier ou de bronze, afin d'empêcher le soulèvement des conducteurs par la force centrifuge.

A titre d'exemple, décrivons l'enroulement d'un tambour composé de 7 spires avec 7 lames au collecteur (fig. 52). Du fil 1, raccordé à la lame 1 du collecteur qui se trouve vis-à-vis, on passe au fil diamétral 2; d'où une connexion courbe raccorde ce dernier à la deuxième lame du collecteur. De là une connexion droite conduit au fil 3 continué diamétralement par le fil 4, nouvelle connexion courbe jusqu'à la troisième lame, connexion sur 5, 6, 7 et ainsi de suite. Quand on est arrivé à 7, l'induit est complètement embrassé par le fil, tandis que la moitié seulement des lames du collecteur sont raccordées. On continue donc par la seconde couche, ici adjacente à la première. L'induit vient se fermer par une connexion courbe, à la connexion droite de départ de la lame 1.

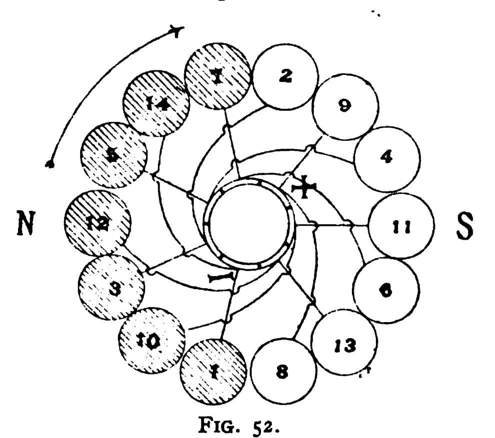


FIG. 52.

Les sections hachurées sont celles où le courant va du lecteur au papier.

Répartition du potentiel au collecteur et dans les conducteurs voisins. — Si nous partons de la lame inférieure du collecteur en suivant la connexion rectiligne, puis le fil à section hachurée, nous constatons que le potentiel s'élève.

Si nous partons de la même lame par la connexion courbe, nous trouvons une force électromotrice orientée en sens inverse et qui va également en augmentant. Les deux courants divergents qui partent de la lame du dessous (balai négatif) se rejoignent aux lames supérieures (balai positif), et nous voyons que la répartition du potentiel est analogue à celle que l'on rencontre dans le collecteur de l'anneau. Elle n'est pas identique, parce que les conducteurs raccordés n'étant pas successifs comme dans l'anneau, les variations de force électromotrice y sont plus accentuées.

Au point de vue des fils eux-mêmes, nous trouvons une différence désavantageuse vis-à-vis de l'anneau. Dans celui-ci, le potentiel croît régulièrement de spire à spire ou, ce qui revient au même, de fil à fil. Ici, deux conducteurs voisins peuvent être soumis à des différences de potentiel très grandes, ce qui augmente les chances de court-circuit. C'est le cas pour les fils 1 et 8 ainsi que 7 et 14, entre lesquels existe toute la différence de potentiel que la machine est susceptible de donner, le balai positif mettant en court-circuit, par raison de symétrie, les lames du collecteur raccordées aux conducteurs 7 et 9. On remarquera que, par suite de la rotation de l'induit, toutes les paires de conducteurs se trouvent successivement dans ce cas deux fois par tour.

Ceci est surtout précaire en cas de rupture brusque du circuit, vu les grandes forces électromotrices qui peuvent y être engendrées par les réactions de *selfinduction*.

Décalage des balais. — De même qu'avec l'anneau et pour les mêmes raisons, les balais doivent être avancés dans le sens du mouvement.

Calage des balais perpendiculairement à la ligne neutre. — Nous venons de voir que pour ramener les deux extrémités d'une spire suivant deux lames adjacentes du collecteur, on est obligé d'établir un raccord suivant un diamètre. On rend parfois les jonctions symétriques par rapport aux spires consécutives en les rattachant à des lames situées à égale distance des dites spires.

C'est ce qui se trouve réalisé dans l'enroulement Edison représenté figure 53.

Il correspond, en somme, à l'enroulement précédent que l'on aurait fait tourner de 90° par rapport au collecteur. Il en résulte que les balais devront être calés à 90° de la position qu'ils occupaient précédemment, c'est-à-dire perpendiculairement à la ligne neutre.

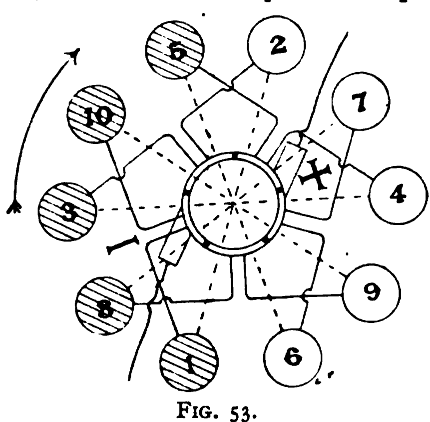


Fig. 53.

Spires raccordées suivant des cordes. — Au lieu de réunir les fils induits par des conducteurs diamétraux, il est possible de les joindre par des cordes, à condition que l'arc sous-tendu soit plus grand que celui des pièces polaires, ceci pour éviter que les spires ne soient le siège de forces électromotrices de même sens dans deux conducteurs opposés, donc de sens contraire dans les spires et venant par conséquent en déduction l'une de l'autre.

Induits multipolaires à tambour enroulés en quantité. — Enroulements ondulés. — Prenons comme exemple un induit tétrapolaire à 16 barres. Traçons (fig. 54) 16 droites parallèles équidistantes, qui représenteront les conducteurs couchés suivant les génératrices de l'induit, dont la surface extérieure est

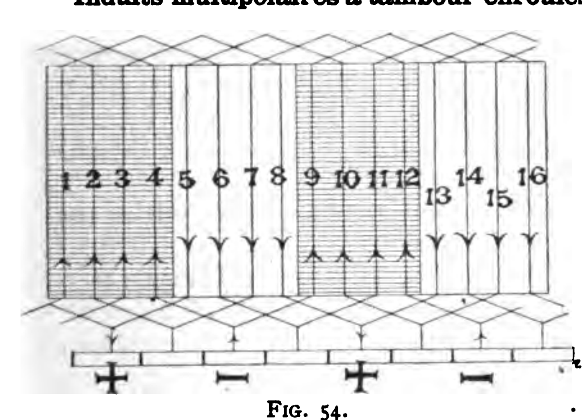


Fig. 54.

développée sur un plan. Numérotons-les et supposons que les quatre premières barres et les barres 9 à 12 soient en face d'un pôle nord envoyant son flux du lecteur vers le papier. Hachurons-les pour les distinguer et supposons que l'induit se déplace de la gauche vers la droite. Traçons sur les conducteurs les flèches indiquant le sens des forces électromotrices développées par la translation de l'induit.

Raccordons maintenant la barre 1 par la partie supérieure avec la barre $1 + 5 = 6$. 5 sera *le pas de l'enroulement*. Partons par le dessous de la barre 6 pour aller rejoindre la barre $6+5=11$. Partons de nouveau du dessus de la barre 11 pour rejoindre la barre 16, puis par le dessous de 16 à 5, et ainsi de suite, pour revenir à la barre de départ 1 par une connexion inférieure. Nous avons ainsi réalisé un *enroulement ondulé à pas égaux*. Chaque raccordement inférieur est connecté avec une lame du collecteur.

La position des balais, deux positifs et deux négatifs, se délimitera aisément par les barres vers lesquelles les courants convergent ou desquelles ils divergent.

On serait arrivé à un enroulement tout à fait analogue, en adoptant le pas 3.

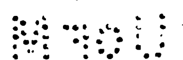
On voit que les quatre quarts de l'induit se trouvent ainsi réunis en quantité. Chaque quart constituant un tout complet et en quelque sorte un enroulement indépendant, devra posséder un nombre pair de barres, puisque chaque conducteur montant est conjugué à un conducteur descendant. En appelant P le nombre de pôles, on aura pour le nombre de conducteurs possible :

$$n = 2kP, \qquad (1)$$

formule dans laquelle on pourra donner à k les valeurs successives de la suite des nombres.

Quant au pas, pour ne point retomber sur la même barre, avant d'avoir épuisé tous les conducteurs, il faut nécessairement qu'il soit représenté par *un nombre premier* avec le nombre des conducteurs.

Supposons, en effet, que le pas soit 4 avec $n = 16$. En partant de la barre 1, après 4 raccordements, on reviendrait sur



la barre $1 + 4 \times 4 = 17 - 16 = 1$. De même, si p et n avaient un facteur commun a, de manière que $p = ab$ et $n = ac$, après le passage par $\frac{n}{a} = c$ barres, on retomberait sur la barre $1 + cp = 1 + cab = 1 + nb$, c'est-à-dire sur la première barre, et l'induit fermé ne comprendrait que $c + 1$ barres au lieu de n.

Dans le cas examiné précédemment, on voit aisément que le pas est donné par la formule

$$p = \frac{n}{P} \pm 1 = 2k \pm 1, \qquad (2)$$

en tenant éventuellement compte de la condition numérique reprise plus haut.

En remplaçant dans (1) k par sa valeur tirée de (2), il vient

$$n = P(p \mp 1). \qquad (3)$$

Telle est la formule générale nous donnant le nombre de barres d'un enroulement multipolaire ondulé à tambour en quantité, dès que l'on connaît le nombre de pôles et le pas. Le signe négatif correspond au cas où le pas est plus grand que la distance de deux pôles consécutifs.

Enroulements imbriqués. — Au lieu de marcher toujours dans le même sens, on peut employer deux pas inégaux alternativement positif et négatif. On obtient alors un *enroulement imbriqué* auquel la formule (3) est applicable en prenant le signe — avec le pas positif et le signe + avec le pas négatif pris positivement.

Reprenons nos 16 barres. Raccordons par le dessus la barre 1 à $1 + 5 = 6$, puis par le dessous la barre 6 à $6 - 3 = 3$, ensuite par le dessus 3 à $3 + 5 = 8$, par le dessous 8 à $8 - 3 = 5$, et ainsi de suite. Nous obtenons une disposition qui, électriquement, est semblable à la précédente.

En pratique, les spires de ce dernier genre d'enroulement sont, dans les petites machines, formées de galettes de fil préparées mécaniquement, superposées sur la surface de l'induit, assujéties par des frettes en fils d'acier et toutes raccordées d'un côté au collecteur. Naturellement, le nombre de

spires est beaucoup plus grand que celui, très restreint, adopté pour la clarté de la figure ci-dessus.

L'avantage de ce système réside dans son démontage aisé pour les réparations et sa forme très compacte.

Tambours multipolaires en série. — Dans ceux-ci, il faut arriver à obtenir deux séries égales de barres, sièges de forces électromotrices égales et contraires. Appelons, avec M. Janet (*), conducteur d'aller une barre telle que AB (fig. 55), et conducteur de retour celle qui achève le second côté actif de la spire. Les connexions des barres entre elles se font successivement, comme nous l'avons vu, d'un côté et de l'autre du tambour, ce qui exige que le nombre de barres soit pair, pour que l'enroulement vienne se fermer à la barre de départ.

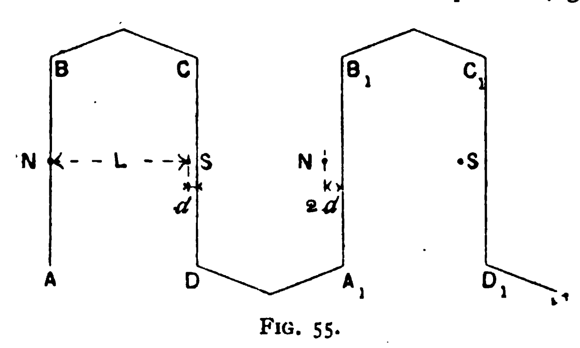


FIG. 55.

Soient P le nombre des pôles distants d'axe en axe de L répartis sur la périphérie de l'induit; l la distance séparant les conducteurs au nombre de n. On aura

$$PL = nl. \tag{4}$$

Supposons que le conducteur d'aller d'une boucle situé en face du milieu d'un pôle nord, tel que AB, soit conjugué avec un conducteur de retour CD situé ou d en avant du centre du pôle contraire consécutif (cas de la figure), ou d en arrière, puis réuni au conducteur d'aller A_1B_1 en avant ou en arrière de $2d$ du centre polaire suivant et ainsi de suite. On réalisera de la sorte un *enroulement ondulé à pas égaux*. En appelant p le pas, c'est-à-dire le nombre d'intervalles égaux à la distance

(*) JANET, *Leçons d'Électrotechnique générale*, p. 137.

entre les axes de deux conducteurs consécutifs, existant entre les conducteurs d'une spire

$$pl = L \pm d. \qquad (5)$$

Pour que l'induit soit subdivisé en deux séries, sièges de forces électromotrices égales et contraires, il faut qu'après avoir raccordé la moitié des conducteurs, on soit arrivé ou à un conducteur de retour situé en face du milieu d'un pôle nord, ou à un conducteur d'aller placé en face du centre d'un pôle sud. En d'autres termes, il faut qu'après avoir raccordé la moitié des barres, on soit en avance, ou en arrière, d'une distance polaire.

La condition fondamentale à remplir sera

$$\frac{n}{2} d = L. \qquad (6)$$

Éliminons maintenant d et L entre les 3 équations, nous obtenons

$$n = pP \pm 2, \qquad (7)$$

le signe — se rapportant au cas où le pas est plus grand que la distance des pôles.

p *est toujours un nombre impair ;* s'il était pair, en effet, il ne pourrait être premier avec n, P étant lui-même toujours pair.

Appliquons cette formule à un induit tétrapolaire avec $p = 3$ et pas plus petit que la distance polaire. Le nombre de conducteurs sera

$$n = 3 . 4 + 2 = 14.$$

Fig. 56.

Divisons la circonférence de l'induit en 14 parties égales (fig. 56) que nous numérotons 1, 2, 3, ... 14. Dessinons les

pôles, les flux ; représentons par un cercle hachuré les conducteurs dans lesquels le courant va dans le sens du lecteur au papier, les autres par un cercle blanc. Raccordons maintenant par une connexion avant (en trait plein) les barres $1 + 3 = 4$ et relions-la, en passant, à la lame 1 du collecteur ; raccordons par une connexion arrière (en trait pointillé) 4 à $4 + 3 = 7$, puis par une connexion avant 7 à $7 + 3 = 10$ et joignons au collecteur, lame numérotée 7, et ainsi de suite. Nous aurons encore deux balais calés à angle droit ; le nombre de lames du collecteur sera, comme toujours, la moitié de celui des barres.

La formule (7) est générale pour le montage série. Elle couvrira le cas des pas inégaux, en remplaçant $2p$ par $p_1 + p_2$.

$$n = (p_1 + p_2)\frac{P}{2} \pm 2. \tag{8}$$

En donnant aux lettres p, p_1, p_2 et P des séries successives de valeurs, impaires pour les trois premières et paires pour la dernière (le nombre de pôles étant toujours pair), on dresserait aisément des tableaux donnant les nombres possibles de conducteurs dans les divers cas qui peuvent se présenter.

Une disposition qui se rencontre fréquemment consiste à faire $p_2 = p_1 + 2$. On a alors

$$n = (2p_1 + 2)\frac{P}{2} \pm 2 = (p_1 + 1)\,P \pm 2. \tag{9}$$

Application aux induits bipolaires. — Pour rencontrer le cas des induits bipolaires, il suffira de poser $P = 2$. (7) et (9) deviendront alors

$$n = 2p \pm 2 = 2(p \pm 1), \tag{10}$$

$$n = 2(p_1 + 1) \pm 2 = 2p_1 + 2 \quad \text{ou} \quad 2p_1. \tag{11}$$

Pas égal a la distance polaire. — Si, dans un enroulement à pas inégaux, un des pas est exactement égal à la distance polaire, les équations (11) se simplifient par la disparition du terme constant. Elles deviennent $n = 2p_1$. C'est le cas de la figure 52, dans laquelle $p_1 = 7$.

Décalage des balais. — De même qu'avec l'anneau, et pour les mêmes raisons, les balais doivent être avancés dans le sens du mouvement.

Formule des anneaux en série. — La formule (7) peut être utilisée pour le cas des induits à anneau enroulés en série, en considérant qu'avec un nombre pair n de barres on ne peut obtenir qu'un nombre moitié moindre de spires de l'anneau. Le nombre de spires de celui-ci est donc

$$n' = \frac{pP}{2} \pm 1.$$

Appliquons au cas de la figure 48 : $P = 4$, $p = 4$, le pas étant plus grand que la distance polaire, il faut prendre le signe négatif. Dès lors, le nombre de spires est : $n' = 4 . 2 - 1 = 7$, ce qui est en effet le nombre de spires utilisées.

Pour les mêmes raisons que précédemment, p devra être premier avec n'.

Induit à disque. — Comme le nom l'indique, cet induit affecte la forme d'un disque. Les conducteurs tournent dans un plan, de manière à couper successivement les lignes de force développées par des pôles situés de part et d'autre de l'armature. Le noyau en fer est supprimé et avec lui les courants de Foucault et l'hystérésis dont il est le siège.

On est naturellement amené à multiplier le nombre des pôles, afin de ne pas arriver à de trop grandes vitesses de rotation pour la production d'une force électromotrice déterminée et les champs que parcourent les conducteurs sont alternativement de sens inverse.

Les induits à disque sont beaucoup moins employés que les autres.

Construction des induits : induits lisses et dentés. — Jusqu'ici nous avons supposé que les fils induits généralement recouverts d'une, deux ou trois couches isolantes de coton, étaient enroulés *sur* le noyau induit, lequel serait donc lisse. On peut aussi, et c'est maintenant le cas général dans les machines très puissantes, découper la périphérie de l'induit de rainures ou même la percer de trous dans lesquels on

loge les conducteurs, soigneusement isolés au mica, à la micanite ou au papier. Ces rainures sont obtenues par la juxtaposition de tôles semblablement découpées à l'emporte-pièce.

Cette disposition permet de réduire l'*entrefer* laissé pour l'enroulement et pour assurer le jeu mécanique des pièces en mouvement.

La réduction de l'entrefer diminue la réluctance du circuit magnétique et permet de réduire la force magnétomotrice à développer par les inducteurs. En outre, l'armature devient plus robuste et l'effort d'arrachement, qui dans les induits lisses sollicite les conducteurs, est ici reporté pour la presque totalité sur la denture, beaucoup plus apte à y résister.

A côté de ces avantages existent plusieurs inconvénients :

1° A cause de la réluctance élevée de l'intervalle compris entre les dents, les lignes de force se partagent en faisceaux sautant d'une dent sur l'autre et brusquement rompus vers les cornes polaires de sortie, d'où production de courants de Foucault intenses dans ces dernières ;

2° Pertes hystérétiques dues aux brusques variations de magnétisme ;

3° Ronflement que font souvent entendre les machines soumises à ces changements périodiques d'état magnétique.

On remédie plus ou moins à ces inconvénients de diverses manières qui font perdre une partie du terrain gagné. Par exemple, le développement des courants de Foucault est combattu en feuilletant les pièces polaires perpendiculairement à l'axe de l'induit ou en les découpant de manière à augmenter l'entrefer vers la sortie.

Quoi qu'il en soit, l'ensemble des avantages des induits dentés l'emporte sur les inconvénients, de sorte qu'ils sont les plus employés aujourd'hui dans les dynamos de moyennes et grandes puissances.

Comparaison des diverses espèces d'induit : supériorité du tambour. — Le disque. — Le disque présente l'avantage de supprimer le fer de l'induit, ce qui réduit sa réaction magnétique sur le champ inducteur, les courants de Foucault et l'hystérésis.

Mais, par suite de la multiplicité des pôles à laquelle on est entraîné et à la plus grande réluctance des circuits, la dépense d'excitation se trouve majorée. En outre, au point de vue mécanique, il est beaucoup plus difficile à consolider que les autres systèmes. Son emploi est très limité.

L'ANNEAU. — L'anneau présente les avantages d'être d'un démontage aisé, ce qui facilite la réparation des sections endommagées ; il permet d'atteindre avec sécurité de hauts voltages, le potentiel croissant régulièrement de spire à spire, ce qui réduit à quelques volts la différence de potentiel entre deux spires consécutives.

LE TAMBOUR. — Par l'enroulement à tambour, on diminue les parties de fil inactives, donc la résistance et les dimensions de l'armature. Mais le tambour, pour les petites machines à induit lisse tout au moins, est plus difficile à enrouler et à consolider. La réparation d'une section endommagée exige souvent le déroulement complet de l'induit. On superpose sur ses bases des conducteurs à potentiels très différents, d'où un isolement plus précaire, particulièrement lorsque la rupture brusque d'un circuit provoque le développement de forces électromotrices élevées de *selfinduction*.

Par contre, la réaction d'induit du tambour est beaucoup moindre que celle de l'anneau. Si nous comparons, en effet, un tambour et un anneau travaillant dans les mêmes conditions, c'est-à-dire ayant même vitesse périphérique, même section de fer, même induction ; développant la même force électromotrice, ce qui entraîne l'égalité des nombres de conducteurs périphériques, nous savons que l'anneau aura des sections présentant deux fois plus de spires que le tambour. La *selfinductance* d'une bobine étant proportionnelle au carré du nombre de spires, les sections de l'anneau auront de ce chef un effet inductif quatre fois plus grand que celles du tambour. Mais, comme les spires de l'anneau embrassent une section de fer deux fois plus petite que celles du tambour (en négligeant la place occupée par l'axe du tambour), il en résulte, en définitive, que le coefficient de *selfinduction* des sections d'un anneau sera environ deux fois plus grand que celui des éléments correspondants d'un tambour.

Le décalage des balais de ce dernier pourra être moindre; sa réaction d'induit sera en conséquence plus faible et son rendement meilleur. Il y a là une cause de supériorité marquée pour le tambour. Dans les grandes machines, l'emploi des induits dentés fait d'ailleurs disparaître les inconvénients énumérés plus haut, de sorte que le tambour est de plus en plus utilisé, comme l'accusait nettement la dernière Exposition universelle de Paris.

Force électromotrice et puissance des machines à courant continu. — Soit (fig. 57) un induit bipolaire à anneau dans lequel le flux $\mathcal{N}$ issu des pôles inducteurs se dérive en deux parties égales $\frac{\mathcal{N}}{2}$ à circuit ouvert.

La spire située en **1** en face du pôle sud ne coupe aucune ligne de force. Quand elle est parvenue aux environs de la ligne neutre en **2**, elle a évidemment coupé le flux $\frac{\mathcal{N}}{2}$ qu'elle embrasse. En **3**, elle est de nouveau parallèle aux lignes de force et en a donc encore coupé $\frac{\mathcal{N}}{2}$.

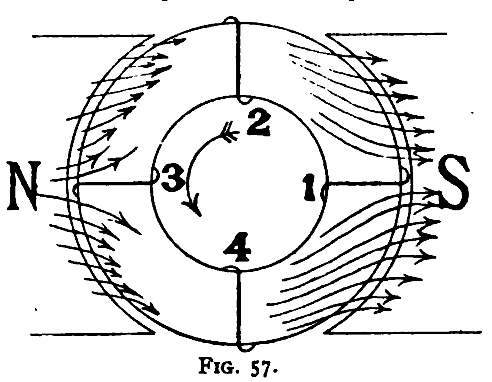


Fig. 57.

En **4**, elle embrasse le flux $\frac{\mathcal{N}}{2}$ qu'elle a dû couper entièrement, enfin de **4** à **1**, elle coupe encore $\frac{\mathcal{N}}{2}$ lignes de force. En un tour, la spire a conséquemment coupé $2\mathcal{N}$ lignes de force. Ceci correspond à une paire de pôles. S'il y avait P pôles, le flux traversé serait $\frac{P}{2} 2\mathcal{N} = P\mathcal{N}$.

Si T est la durée d'une révolution, la force électromotrice moyenne induite dans la spire traversant un champ bipolaire a pour expression, en vertu de la règle générale de l'induction,

$$e = -\frac{d\mathcal{N}}{dt} = \text{abstraction faite du signe } \frac{2\mathcal{N}}{T} = 2N\mathcal{N},$$

en appelant N le nombre de révolutions par seconde de l'induit. S'il y a n spires autour de l'anneau, comme $\frac{n}{2}$ sont en tension, la force électromotrice développée est

$$\frac{n}{2} \cdot 2N\mathcal{N} = nN\mathcal{N}.$$

On retiendra aisément cette formule : *La force électromotrice engendrée est égale au produit des trois* n.

Ceci est en unités CGS. En volts, nous avons $nN\mathcal{N}10^{-8}$. Dans le cas d'un induit à tambour, nous obtenons encore la même quantité, n étant le nombre de conducteurs comptés sur la périphérie du tambour.

On obtient aussi la même formule pour un induit multipolaire en anneau, tambour ou disque enroulé *en quantité*, en désignant par $\mathcal{N}$ le flux émanant de *l'un* des pôles inducteurs. (Dans le cas d'un disque, n est le nombre total de fils radiaux.) En effet, soient P pôles. Le flux coupé en un tour par une spire est, comme nous venons de le voir, $P\mathcal{N}$. Par seconde ou en N tours, c'est $PN\mathcal{N}$ et, puisqu'il y a $\frac{n}{P}$ spires en tension, on a pour force électromotrice $nN\mathcal{N}$.

Quand l'induit multipolaire est enroulé en tension, nous avons encore pour le flux coupé en une seconde par une spire $PN\mathcal{N}$, mais ici $\frac{n}{2}$ spires sont en tension, de sorte que la force électromotrice est $\frac{n}{2}\,PN\mathcal{N}$.

On voit aisément que la formule couvrant tous les cas sera

$$E = \frac{nN\mathcal{N}P}{D}\,10^{-8} \text{ volts,}$$

D étant le nombre de circuits dérivés.

Nous avons supposé le circuit induit ne débitant pas de courant, c'est-à-dire nulle la réaction due au passage de ce dernier. Les résultats auxquels on arrive restent les mêmes en fonctionnement, $\mathcal{N}$ étant toujours le flux entrant ou sortant de chaque côté de l'induit.

En vertu de la règle de Faraday, le travail dû au déplacement d'un conducteur traversé par un courant I est égal au produit de l'intensité du courant par le nombre de lignes de force coupées. La *puissance* développée est représentée par

le produit de l'intensité par le nombre de lignes de force coupées *en une seconde.*

D'après cela, en désignant par $\mathcal{N}$ le flux se partageant dans un anneau bipolaire et $\frac{I}{2}$ le courant parcourant chaque moitié de l'enroulement, la puissance développée par chaque spire sera $2N\mathcal{N}\frac{I}{2}$ et l'on obtiendra pour la puissance totale produite par les n spires de l'anneau, ou les n fils périphériques du tambour ou radiaux du disque,

$$2nN\mathcal{N}\frac{I}{2} = EI\ 10^{-8} \text{ watts},$$

I étant exprimé en ampères.

Puissance approximative des dynamos. — D'après M. Snell, entre 10 et 100 kw, l longueur, et d diamètre extérieur de l'induit étant exprimés en centimètres :

$$P = 0{,}037\ ld^2N \text{ watts pour l'anneau}$$
$$\text{et}\quad P = 0{,}055\ ld^2N \quad \text{»} \quad \text{le tambour.}$$

Inductions et vitesses admises. — Induction 10 000 à 18 000 gauss. Vitesses périphériques en mètres par seconde : tambour et anneau long 10 à 15 ; disque et anneau court 15 à 25.

Dimensions relatives de l'induit. — Par rapport au diamètre extérieur :

Diamètre intérieur. .	Anneau.	0,6 à 0,8
	Tambour	0,3 à 0,6
Longueur.	Anneau.	0,5 à 1,5
	Tambour	1,5 à 3.

Densité de courant. — Dans les conducteurs de l'induit : 2 à 6 A par millimètre carré,

dans les balais en cuivre	23 à 27	ampères par cm²	de surface frottante.
» laiton	15 à 20	»	»
» charbon	4 à 7	»	»

Surface de refroidissement de l'induit par watt dépensé 5 à 10 centimètres carré.

Collecteur. — Différence de potentiel entre deux touches successives suivant débit, 3 à 7 volts.

§ 2. — CIRCUIT MAGNÉTIQUE DES DYNAMOS. DIVERS MODES D'EXCITATION.

Les inducteurs comportent généralement des noyaux autour desquels s'enroule le fil parcouru par le courant magnétisant. Les noyaux sont réunis par une culasse et portent à leurs extrémités libres des épanouissements ou pièces polaires embrassant l'armature.

Le métal principalement employé aujourd'hui pour la fabrication de ces organes est l'acier coulé. On évite le plus possible les joints, source de résistance magnétique. Pour diminuer celle-ci, on alèsera soigneusement ceux que l'on est obligé d'admettre.

Machines magnéto-électriques. — Les aimants permanents ne sont guère utilisés que dans les appareils de petite taille réservés à certaines applications spéciales.

Le champ magnétique inducteur développé au moyen d'aimants permanents est en effet relativement faible, ce qui, la force électromotrice d'une dynamo étant proportionnelle à l'intensité du champ, conduirait à des machines trop volumineuses et par suite trop coûteuses et de mauvais rendement, s'il s'agissait d'établir des machines puissantes.

Excitation indépendante. — Le courant magnétisant les inducteurs peut être fourni par une petite dynamo spéciale dite *excitatrice,* dont le circuit est entièrement distinct de celui de l'induit.

La force électromotrice développée

$$E = nN\mathcal{N} \, 10^{-8} \text{ volts}$$

serait constante à vitesse N constante, n'était la réaction de l'induit sur le champ inducteur qui réduit celui-ci au fur et à mesure que le courant débité par l'induit augmente.

Auto-excitation. Amorcement. — Généralement les machines industrielles sont excitées par tout ou partie du

courant de leur induit. Voici comment se fait l'*amorçage* de la machine. Grâce au magnétisme que gardent les inducteurs une fois qu'ils ont été aimantés, un champ d'ailleurs fort faible traverse l'induit au repos. Dès que celui-ci se met à tourner, une faible force électromotrice est engendrée.

Si certaines conditions initiales que nous étudierons plus loin sont satisfaites, le courant passant dans les inducteurs développe un champ qui vient s'ajouter au champ rémanent coupé par l'induit et qui majore conséquemment la force électromotrice développée dans celui-ci. Cette majoration de la force électromotrice a pour effet, la résistance du circuit étant restée la même, d'augmenter l'intensité du courant inducteur et par suite celle du flux qui renforce derechef la force électromotrice et ainsi de suite. En quelques instants, la machine fournit son voltage normal; elle est *amorcée*.

Lorsque les connexions des inducteurs ont été faites à rebours, le courant qu'on y envoie produit une force magnétisante inverse de celle que développe le champ rémanent. Celui-ci disparaît progressivement par un cycle inverse à celui que nous venons de décrire; la machine ne s'amorce pas. Une simple permutation des fils d'entrée et de sortie du courant rétablit les choses dans l'ordre.

Inducteurs en série. — Le système le plus simple consiste à faire passer tout le courant dans les inducteurs en embrochant ceux-ci en *série* avec l'induit et le circuit extérieur (fig. 58). Les bobines inductrices doivent naturellement présenter la plus faible résistance possible, afin de diminuer les pertes par effet Joule; elles sont donc enroulées au moyen de gros fil.

Le diagramme (fig. 59) montre nettement la disposition du circuit; r est la résistance de l'induit, s celle de l'enroulement des inducteurs et R celle du circuit extérieur.

Le courant a pour valeur

$$I = \frac{E}{r + s + R} = \frac{nN\mathcal{N}}{r + s + R},$$

d'où l'on tire pour la valeur du flux traversant l'induit

$$\mathfrak{N} = \frac{I(r+s+R)}{nN}.$$

Cette équation montre que dans la machine série, et pour autant que l'on ne dépasse pas le coude de la courbe du magnétisme, le flux utile et par suite *la force électromotrice engendrée croissent proportionnellement au courant débité par l'induit.*

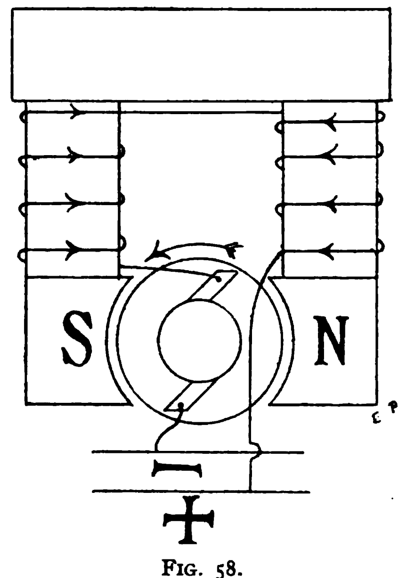


FIG. 58.

D'autre part, en appelant $\mathfrak{R}$ la réluctance du circuit magnétique de la dynamo, m le nombre de spires de ses inducteurs, on a pour le flux qu'ils émettent, en négligeant la réaction d'induit :

$$\mathfrak{N}' = \frac{4\pi m I}{\mathfrak{R}}.$$

Toutes les lignes de force émises ne traversant pas l'induit, à cause des dérivations magnétiques s'établissant dans l'air ambiant, il est nécessaire que l'on ait

$$\mathfrak{N}' > \mathfrak{N}$$

ou

$$4\pi n N m > \mathfrak{R}(r+s+R)$$

ou encore

$$r+s+R < \frac{4\pi n N m}{\mathfrak{R}}.$$

FIG. 59.

Il y a donc, pour les machines série, une valeur maximum de la résistance, au-dessus de laquelle l'auto-excitation ne se produit plus.

Comme la machine doit au moins s'amorcer en court-circuit, ou pour $R = 0$, il faut donc que l'on ait à la limite

$$(r + s)\,\mathfrak{R} < 4\pi n N m.$$

Dans les très petites dynamos, cette condition n'est fréquemment pas remplie, à cause de la grande résistance électrique résultant de l'emploi de fil fin et de l'importance relativement grande de l'entrefer. Aussi les petites machines série ont-elles souvent pour inducteurs des aimants permanents.

La puissance totale EI fournie par la machine se subdivise en une partie $I^2(r + s)$ dépensée en échauffement dans le fil de l'induit et des inducteurs, et une partie I^2R dépensée dans le circuit extérieur. Cette dernière seule est utilisable plus ou moins complètement, par l'intermédiaire de récepteurs.

C'est le même courant qui traverse tout le circuit. En appelant e la différence de potentiel aux bornes, on a

$$I = \frac{e}{R} = \frac{E}{r + s + R}, \quad \text{d'où} \quad e = E \cdot \frac{R}{r + s + R}.$$

Le voltage aux balais sera d'autant plus grand, que la résistance intérieure de la machine sera plus petite par rapport à la résistance extérieure.

Nous venons de voir que la résistance extérieure ne doit pas dépasser un certain quantum, pour que la machine puisse s'amorcer.

D'autre part, au-dessous d'une certaine valeur de cette même résistance, l'intensité du courant peut atteindre une valeur dangereuse pour la conservation de la dynamo. Il faut donc éviter avec soin tout court-circuit accidentel, en intercalant à la suite de la machine un interrupteur automatique qui rompt progressivement le circuit, lorsque le courant dépasse la limite de sécurité.

Il faut également éviter toute rupture brusque du circuit, laquelle pourrait donner lieu à des forces électromotrices d'induction élevées, provoquant des effets destructifs pour l'isolant des conducteurs.

Une propriété fort utile de ce genre d'excitation est que le

calage des balais peut rester invariable dans les limites de saturation des noyaux, puisque le champ inducteur, comme les champs transversaux, restent proportionnels au courant.

Enfin, remarquons que si la machine étant connectée avec des appareils électrolytiques, qui produisent comme nous le savons une force électromotrice opposée à celle de la source, le moteur qui l'entraîne vient à ralentir, son voltage baisse proportionnellement; lorsqu'il arrivera à être inférieur à celui du circuit d'utilisation, le courant sera renversé dans les inducteurs, les pôles seront intervertis et, l'induit continuant à tourner dans le même sens, la force électromotrice engendrée changera de signe, en sorte que le courant, vu la faible résistance de la machine, pourrait acquérir brusquement une valeur dangereuse au point de vue de l'effet Joule; en tout cas, il faudrait la réamorcer. La dynamo en série ne convient donc pas pour les opérations électrolytiques.

Inducteurs en dérivation. — Ici le circuit des inducteurs est monté en dérivation sur les circuits induit et extérieur (fig. 60 et 61). Dès lors, le sens du courant y reste invariable, quelle que soit la direction du courant dans le circuit extérieur, comme il est facile de s'en rendre compte, et l'inconvénient signalé ci-dessus pour la machine série disparaît.

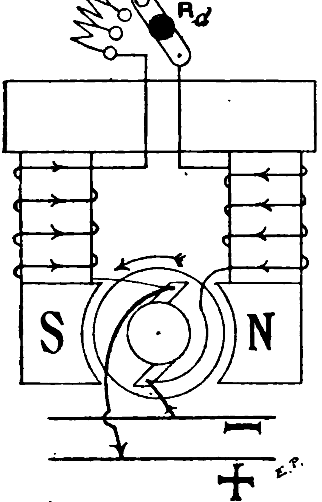


Fig. 60.

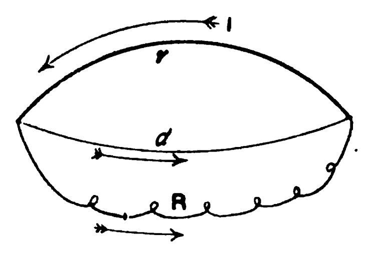


Fig. 61.

On a

$$I = \frac{E}{r + \frac{dR}{d+R}} = \frac{nN\mathfrak{N}}{r + \frac{dR}{d+R}}, \quad (1)$$

d désignant la résistance des bobines en dérivation, lesquelles, en vertu de la loi des courants dérivés, sont traversées par un courant

$$i_d = I \frac{R}{d+R}. \quad (2)$$

Enfin, on a l'équation

$$\mathfrak{M}' = \frac{4\pi m i_d}{\mathfrak{R}}, \quad (3)$$

en appelant comme précédemment m le nombre de spires des inducteurs. En écrivant que $\mathfrak{M}' > \mathfrak{M}$ et éliminant i_d, on obtient

$$\mathfrak{R}\left(\frac{rd}{R} + r + d\right) < 4\pi m n N.$$

En partant d'une grande valeur de la résistance extérieure R et la faisant décroître progressivement, on voit qu'il arrivera un moment où l'équation de condition ne sera plus satisfaite et la machine se désamorcera.

A l'inverse de ce qui a lieu pour les dynamos en série, il n'y a donc aucun danger à mettre une machine en dérivation en court-circuit.

Enfin, à circuit ouvert $R = \infty$, de sorte que l'équation de condition étant remplie, la machine s'amorcera. Elle fonctionne d'ailleurs alors comme machine série.

Le courant passant par l'inducteur est prélevé sur le courant total débité par l'induit. Il réduit le courant utile dépensé dans le circuit extérieur; aussi y a-t-il intérêt à le diminuer le plus possible. La force magnétomotrice $4\pi m i_d$ qu'il développe peut être obtenue soit en agissant sur i_d, soit sur m. Le premier moyen devant être rejeté pour la raison que nous venons d'indiquer, reste le second. En pratique, on constitue donc les enroulements inducteurs des machines en dérivation, de fil fin enroulé en un grand nombre de spires

présentant une grande résistance électrique, de manière que le courant qui les traverse $i_d = \frac{e}{d}$ soit minime.

Pour une induction magnétique donnée des noyaux inducteurs, la *selfinductance* étant proportionnelle au carré du nombre des spires, on voit qu'elle sera beaucoup plus grande dans une machine en dérivation que dans une machine en série, bien que le courant y soit beaucoup moins intense.

Cette selfinductance peut déterminer des étincelles capables d'endommager l'isolant des conducteurs, si l'on coupe brusquement le circuit des inducteurs. Il y aura donc lieu de ne rompre celui-ci que progressivement, par l'intermédiaire de résistances graduellement croissantes.

La résistance de l'induit est généralement fort faible (quelques centièmes d'ohm dans les machines moyennes). La chute de potentiel y est conséquemment faible, de sorte que l'on dispose aux balais de la presque totalité de la force électromotrice développée par la machine. A vitesse constante et flux magnétique constant, le voltage resterait donc à peu près invariable.

Rhéostat de champ. — Mais lorsque le courant augmente, la réaction d'induit vient s'ajouter à la perte de charge, pour réduire la force électromotrice engendrée, et la différence de potentiel disponible aux balais diminue. Comme il est nécessaire, pour la plupart des applications, d'assurer la constance du voltage appliqué, il convient de pouvoir contre-balancer la réaction d'induit lorsqu'elle se manifeste. Pour cela, il faut intercaler une résistance variable en série avec les inducteurs, de manière à permettre de renforcer les flux qu'ils émettent, proportionnellement à la perte de flux due aux courants de circulation dans l'induit.

Les machines en dérivation sont donc toujours pourvues d'une résistance subdivisée appelée rhéostat de champ. Celle-ci est en général constituée par un cadre en fer supportant des séries de boudins métalliques suspendus verticalement à des isolateurs en porcelaine et fixés à leurs extrémités dans des plots disposés en arc de cercle, sur lesquels vient appuyer un levier de contact. Les touches sont assez rapprochées,

pour que le levier touche simultanément deux plots en passant d'une position à la suivante.

On peut, à l'aide de cet appareil, insérer une résistance plus ou moins grande dans le circuit des inducteurs, de manière à diminuer ou augmenter à volonté l'intensité du courant dérivé, donc du champ inducteur. Mais ceci exige des manœuvres lorsque l'intensité du courant d'utilisation varie.

Il serait impossible de régler les machines à la main, quand les variations sont nombreuses. On recourt alors aux dynamos *compounds*, qui assurent automatiquement l'invariabilité du calage des balais et de la différence de potentiel utilisable.

Inducteurs à excitation composée ou machines compounds. — Nous avons vu plus haut que l'enroulement en série confère à la machine la propriété suivante : Le voltage aux bornes croît avec le débit. D'autre part. si l'enroulement est en dérivation, le voltage *baisse* avec le débit par suite de la perte de charge et de la réaction d'induit. On comprend donc aisément que la combinaison de ces deux modes d'excitation, dans une même machine (fig. 62), rende le voltage invariable entre certaines limites. On obtient ainsi une machine *compound*.

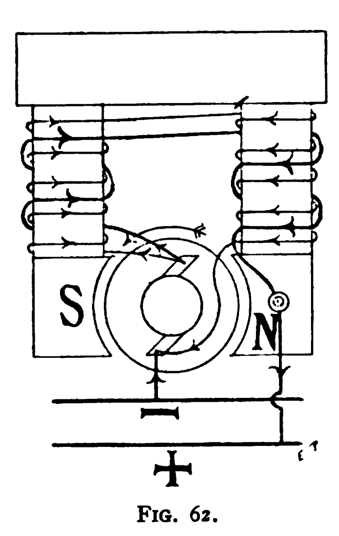


Fig. 62.

Dès que, par suite de l'augmentation de la charge, la force magnétomotrice de l'enroulement en dérivation faiblit, celle de l'enroulement en série augmente et compense la réduction de l'autre.

Le calcul des enroulements s'établit comme suit : L'enroulement en dérivation est calculé pour développer, à vide, le

voltage normal. On détermine de même le nombre d'ampères-tours nécessaires pour obtenir aux bornes le même voltage normal, lorsque la machine fonctionne à son maximum de charge, c'est-à-dire quand les pertes de la dynamo sont maxima. La différence des deux nombres trouvés donne le nombre d'ampères-tours que l'enroulement en série doit comporter.

Le problème à résoudre peut être, non pas de maintenir la tension constante aux bornes, mais bien aux extrémités d'une canalisation où se trouvent les appareils d'utilisation. La résistance de cette canalisation étant R et le courant qui le traverse i, nous savons que la chute de tension y sera Ri. Elle augmentera avec i, de sorte que pour maintenir le voltage e — Ri constant, il faudra que e voltage aux bornes croisse avec le courant. C'est ce que fournit la machine *hypercompound*, dans laquelle l'enroulement en série est prédominant.

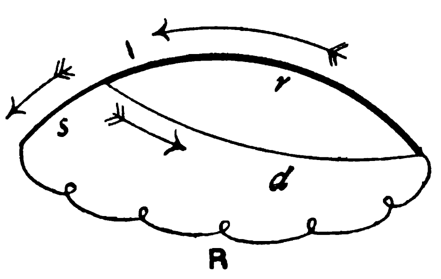


FIG. 63.

Les bobines en dérivation peuvent occuper deux positions par rapport aux autres organes de la machine : ou bien elles sont branchées directement sur l'induit, et l'on a la *compound à courte dérivation* (schéma 63),

$$I = \frac{E}{r + \frac{d(s+R)}{d+s+R}},$$

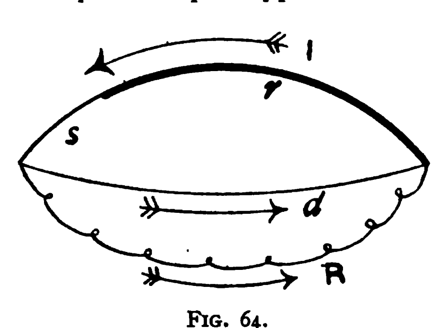


FIG. 64.

ou bien elles sont branchées en dérivation sur l'induit et les inducteurs (fig. 64), et l'on a la *compound à longue dérivation.*

La valeur du courant devient

$$I = \frac{E}{r + s + \frac{dR}{d + R}}.$$

Avec la courte dérivation, le courant dérivé subit des variations moindres que dans le second cas, puisque dans ce dernier toutes les variations du courant principal ont, par les pertes de voltage qui en résultent dans l'enroulement en série, une répercussion directe sur le voltage appliqué aux bornes de l'enroulement en dérivation. On arrive donc à maintenir le potentiel constant avec un moindre nombre d'ampères-tours en série, dans le premier cas que dans le second.

On emploie surtout les dynamos *compound* dans les petites installations privées, où les machines ne sont pas contrôlées incessamment et où une augmentation de voltage pourrait faire brûler les lampes. On les utilise également lorsque les variations de charge sont très brusques, comme c'est le cas pour les génératrices des usines centrales de tramways électriques.

Excitation à demi-tension : compound système Sayers. — M. Sayers a fait connaître un mode d'excitation des dynamos bipolaires en dérivation qui, sans aucun enroulement supplémentaire, les transforme en *compound*.

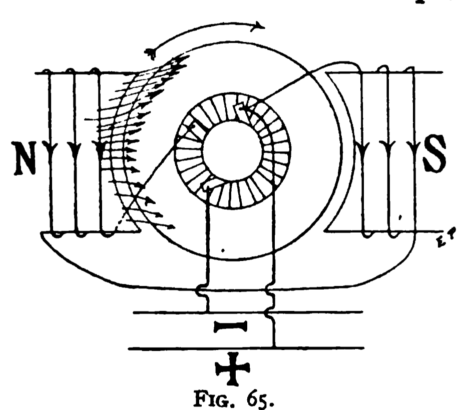


Fig. 65.

Quand on dispose un troisième balai (fig. 65) sur le collecteur d'une dynamo bipolaire, à distance à peu près égale des deux autres balais, la différence de potentiel entre

ce troisième balai et chacun des deux autres est sensiblement la même et égale à la moitié de la force électromotrice de la dynamo à circuit ouvert.

Si l'on charge la machine, le champ inducteur est distordu, ce qui a pour conséquence de réduire la différence de potentiel entre le troisième balai et le balai arrière et d'augmenter, au contraire, cette différence de potentiel avec le balai avant, puisque, la densité du champ étant plus grande, dans cette région, les forces électromotrices élémentaires engendrées dans les spires successives y sont plus élevées que dans celles passant dans le champ plus faible de la région inférieure. Ces variations sont sensiblement proportionnelles à la charge, dans les limites fixées par la perméabilité magnétique du système. Si l'enroulement en dérivation est calculé pour produire la force magnétomotrice nécessaire à la marche à vide en lui appliquant une différence de potentiel égale à la moitié de la force électromotrice de la machine et qu'il soit couplé entre le troisième balai et le balai avant, l'accroissement de charge augmentera automatiquement l'excitation. On obtiendra ainsi une auto-régulation, sans avoir recours a un double enroulement des inducteurs.

Principales formes des inducteurs. — La valeur de la réluctance $\mathcal{R} = \frac{l}{\mu s}$ montre que pour obtenir le plus grand flux possible avec une force magnétomotrice et un métal donnés, il convient d'assigner à l la plus faible et à s la plus grande valeur possible. Les électro-aimants seront donc courts et gros. D'autre part, au point de vue de l'économie de cuivre, il y aura avantage d'adopter la section circulaire, celle-ci possédant le périmètre minimum.

Inducteurs bipolaires. — Nous avons donné plus haut (fig. 40, 42 et 44) la forme des inducteurs *Edison*. Ils présentent un inconvénient : le socle de l'appareil, généralement en fonte, absorbe un certain nombre de lignes de force perdues au point de vue utile. On y remédie partiellement en interposant, entre le bâti et le socle, une plaque en métal non magnétique, par exemple en zinc.

Pour l'éviter entièrement, *Gramme*, notamment, a renversé la disposition (fig. 66) en plaçant l'induit à la partie supérieure. Dans ce cas, il convient toutefois de modifier la forme des expansions polaires supérieures. Si le développement de celles-ci en face de l'induit était simplement symétrique par rapport à l'horizontale passant par l'axe de rotation, la partie du flux bifurquant dans le bas de l'induit et empruntant les parties latérales intérieures des noyaux et de la culasse, parcourant un chemin moins long, donc moins réluctant, serait plus dense que celle passant par la partie supérieure. Il en résulterait une attraction plus forte vers le bas, surchargeant les paliers et une dissymétrie du champ obligeant à un décalage inégal des balais. On donne, en conséquence, plus de développement aux expansions polaires supérieures. Mais ce type présente moins de stabilité que le précédent, la partie pesante étant reportée au sommet.

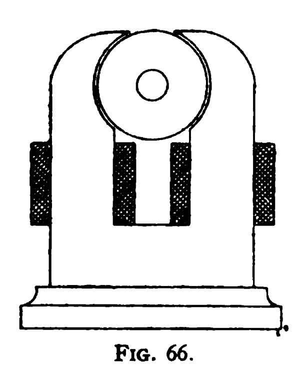


Fig. 66.

Le type *Manchester* (fig. 67) comporte deux noyaux verticaux créant des pôles conséquents dans les expansions polaires. Il y a donc deux circuits magnétiques distincts comportant chacun un noyau, deux demi-expansions polaires, un demi-induit. On arrive ainsi à rendre le champ plus symétrique par rapport à l'axe de l'induit.

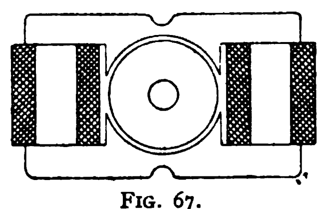


Fig. 67.

Au-delà d'un diamètre extérieur de l'induit de 40 centimètres, on doit recourir aux machines multipolaires, parce que les flux transversaux prennent trop d'importance.

Inducteurs multipolaires. — Ou bien les pôles sont à l'*intérieur* de l'induit (fig. 68), ou ils sont *extérieurs*.

Dans ce dernier cas, on distingue deux variantes : *a*) les

noyaux et bobines sont disposés *perpendiculairement* à l'induit (fig. 69); *b*) ils sont tangents, système *Thury* (fig. 70).

Les diverses bobines excitatrices sont montées en tension entre les balais.

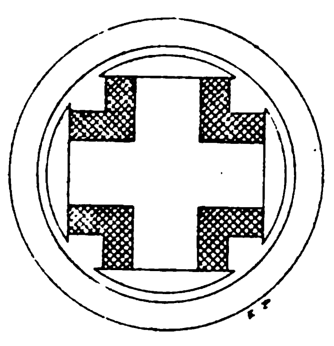


Fig. 68.

Nombre de pôles a adopter. — Jusque 50 kw environ les machines sont tétrapolaires; jusque 100, hexapolaires; jusque 400, octopolaires; jusque 800, décapolaire, etc.

Flux perdu. — Le flux développé par les inducteurs n'est jamais absorbé complètement par l'induit. Une portion plus ou moins grande, suivant le type, la puissance et le nombre de pôles des dynamos, se

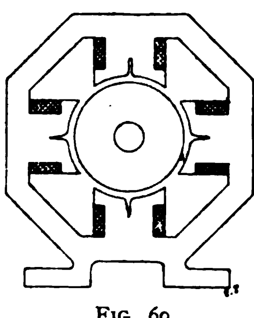


Fig. 69.

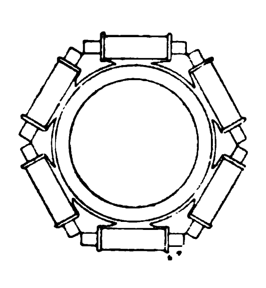


Fig. 70.

disperse dans l'air ambiant et, n'étant pas coupée par les conducteurs de l'induit, se trouve perdue au point de vue de la production de la force électromotrice.

Le coefficient de dispersion varie de 1,10 pour une bipolaire de 300 kw, à 1,9 pour une machine à disque de 5 kw.

Inductions admises. — Dans les inducteurs en fer et acier doux, 10 000 à 18 000 gauss; dans les inducteurs en fonte, 6 000 à 10 000 gauss.

Densité de courant. — 2 à 6 A par millimètre carré de section de fil inducteur.

Surface de refroidissement des bobines inductrices par watt dépensé : 10 à 20 centimètres carrés.

§ 3. — SUPPRESSION DES ÉTINCELLES AU COLLECTEUR. RENDEMENTS. TABLEAUX DE DISTRIBUTION.

Suppression des étincelles. — Nous avons vu que pour obtenir une commutation sans étincelles aux balais, il faut avancer ceux-ci dans le sens du mouvement, ce qui fait naître la réaction d'induit et diminue la force électromotrice disponible. Divers moyens sont employés pour réduire cette réaction.

1. Saturation des noyaux. — L'étude de la commutation sans étincelles nous a montré qu'il y avait avantage, pour diminuer le coefficient de *selfinduction* des spires, de saturer fortement le noyau de l'induit. D'une manière générale, on conçoit qu'il est avantageux d'adopter les inductions les plus élevées possible dans toutes les parties du circuit magnétique, puisque alors les faibles champs développés par la circulation des courants dans l'induit auront moins d'importance et que les dimensions seront moindres.

2. Sectionnement des pièces polaires. — On réduira l'influence des flux transversaux en rendant leur circuit plus réluctant, ce qui se réalise en ménageant des fentes longitudinales dans les expansions polaires (voir fig. 69).

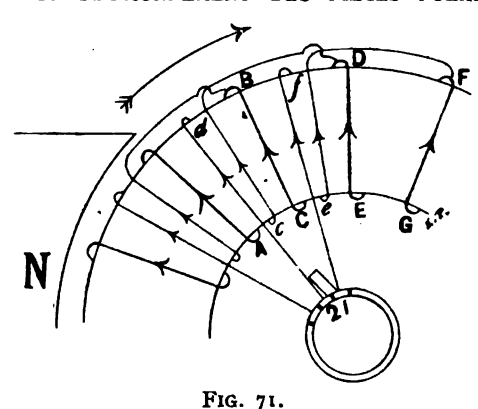


Fig. 71.

3. Enroulements supplémentaires. — M. Sayers raccorde l'enroulement habituel ABCD... (fig. 71) non pas directement aux lames du collecteur, mais après intercalation d'une ou de plusieurs

spires *abcd*... enroulées en sens inverse du bobinage principal et décalées en arrière par rapport aux spires auxquelles elles sont conjuguées, de manière à mettre en série avec la ou les spires commutées une ou plusieurs spires, siège de forces électromotrices opposées à l'extracourant.

Voyons ce qui se passe pendant la mise en court-circuit de la spire DEF, par exemple, raccordée aux lames 1 et 2 du collecteur, par l'intermédiaire des bobines *fe*, *dc*. Partons de la lame 1 et remontons vers l'anneau. Nous rencontrons d'abord la bobine *fe* qui, se trouvant dans la région neutre, ne développe qu'une force électromotrice négligeable. Nous arrivons dans l'enroulement principal en F ; la spire FED est le siège d'une force électromotrice de *selfinduction* dirigée dans le sens du courant de la moitié gauche de l'induit, c'est-à-dire dans le sens des flèches; nous rencontrons alors la spire *dc* située près de la corne polaire de sortie dans laquelle est développée une force électromotrice intense dirigée en sens contraire de la précédente et annulant son effet si les dispositions ont été bien prises.

Le dispositif Sayers est compliqué. En outre, n'étant pas symétrique par rapport à l'axe neutre, il ne permet pas la marche en sens inverse.

On peut aussi produire, dans la région neutre, à l'aide de pôles auxiliaires, des champs supplémentaires engendrant dans la bobine en commutation la force électromotrice nécessaire pour arriver au but.

4. Bobinages spéciaux. — En composant chaque section d'un induit à anneau de deux bobines décalées d'une quantité suffisante, MM. Mordey et Brown arrivent également à supprimer complètement les étincelles.

On obtient le même résultat dans les induits à tambour, en adoptant un enroulement dont les pas sont notablement moindres que la distance polaire augmentée ou diminuée d'une unité, adoptée jusqu'ici. On sacrifie d'ailleurs ainsi un certain nombre de conducteurs perdus au point de vue de la production de la force électromotrice. Choisissons, par exemple, un induit bipolaire à enroulement imbriqué. Divi-

sons la circonférence en 20 parties égales. Puis, partant de la barre 1 (fig. 72) près de la ligne neutre, nous passons par une connexion diamétrale derrière (en pointillé) à la barre 1 + 7 que nous numérotons 2 ; nous nous raccordons par une connexion avant (en trait plein) à la barre 8 — 5 = 3 que nous numérotons 3, et ainsi de suite. Suivons maintenant l'enroulement en adoptant comme sens de marche positif le parcours avant-arrière, comme sens de marche négatif le parcours arrière-avant, les forces électromotrices développées ayant les mêmes signes quand elles tendent à envoyer le courant dans ces directions. La force électromotrice d'induction est supposée nulle pour les barres se trouvant en dehors des expansions polaires. Nous pourrons écrire :

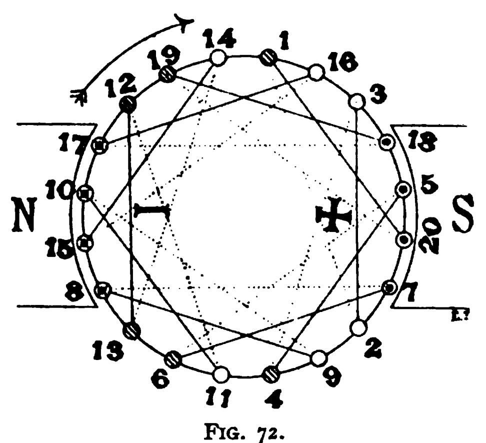


Fig. 72.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Sens de marche .	+	—	+	—	+	—	+	—	+	—	+	—	+	—	+	—	+	—	+	—
Force électromotrice					—		—	+		+					+		+	—		—

(Barres 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20)

La force électromotrice sera donc orientée en sens inverse du parcours dans les barres 5, 7, 8 et 10, dans le même sens dans les barres 15, 17, 18 et 20. Par raison de symétrie, nous placerons le balai positif entre 2 et 3, le balai négatif entre 12 et 13. Ils seront diamétralement opposés.

Partons du balai négatif. Nous rencontrons les deux séries de conducteurs *extérieurs* aux expansions polaires, dans lesquelles le courant est dirigé conformément aux signes placés ci-dessous :

12,	11,	9,	6,	4,	3;	13,	14,	16,	19,	1,	2,
+	—	—	+	+	—	+	—	—	+	+	—

de sorte qu'au lieu de rencontrer des deux côtés de la ligne neutre deux séries de conducteurs parcourus par des courants de même sens (voir fig. 52), la direction des courants est ici différente, ce qui réduit la réaction d'induit.

Nous avons hachuré, sur la figure 72, les conducteurs inactifs dans lesquels le courant est dirigé d'avant en arrière. On voit que les deux spires fictives constituées avec les barres 1 et 11, 14 et 4 (ce qui ne change rien aux effets magnétiques produits sur le noyau) se neutralisent exactement.

5. Balais résistants. — L'extracourant dû à la mise en court-circuit de la spire est d'autant moins intense que le circuit dans lequel il se développe est plus résistant. On augmente la résistance du circuit des spires passant sous les balais en feuilletant ceux-ci de manière que le courant arrivant à une des touches (fig. 73), doive suivre les feuilles du balai, remonter jusqu'à la soudure qui les réunit à leur extrémité opposée au collecteur, redescendre par les feuilles en contact avec la seconde touche, pour enfin atteindre cette dernière.

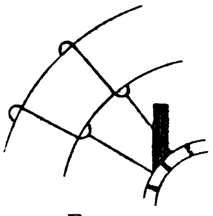


Fig. 73.

De bons résultats sont obtenus dans cet ordre d'idées en remplaçant le cuivre par le charbon dur que l'on cale perpendiculairement au collecteur, ce qui permet la marche dans les deux sens sans devoir retourner les balais.

En pratique, c'est surtout l'emploi des moyens 1 et 5 qui prévaut. Ils conduisent, pour des machines bien établies, à des résultats très satisfaisants.

Rendements. — On en distingue trois. En désignant par :

P_m la puissance *mécanique* en watts dépensée sur l'arbre du générateur, mesurée au dynamomètre de transmission;

P_t la puissance électrique *totale* produite par le générateur;

P_u la puissance électrique *utile* disponible aux bornes :

$\frac{P_t}{P_m}$ est le coefficient de transformation;

$\eta_e = \frac{P_u}{P_t}$ est le rendement électrique;

$\eta_i = \frac{P_u}{P_m}$ est le rendement industriel ou commercial.

Appelons comme précédemment: E, la force électromotrice totale en volts développée dans la dynamo; *e*, la différence de potentiel utile, en volts prise aux bornes extérieures, c'est-à-dire à celles sur lesquelles se branche le circuit d'utilisation; I, i_d, *i*, les intensités du courant en ampères, dans l'armature, dans les inducteurs en dérivation et dans le circuit extérieur; *r*, *s*, *d*, R, les résistances en ohms, mesurées à chaud, de l'induit, de l'enroulement en série, de l'enroulement en dérivation et du circuit extérieur.

Dans une machine série, nous aurons pour un régime quelconque

$$E = e + I(r + s) \quad \text{et} \quad \eta_e = \frac{eI}{EI} = \frac{e}{E}.$$

Dans une machine en dérivation (fig. 61) :

$$E = e + r(i_d + i); \quad d = \frac{e}{i_d}; \quad \eta_e = \frac{ei}{EI}.$$

Dans une machine *compound* à court *shunt* (fig. 63) :

$$E = e + is + r(i_d + i); \quad d = \frac{e + is}{i_d}; \quad \eta_e = \frac{ei}{EI}.$$

Dans une machine *compound* à long *shunt* (fig. 64) :

$$E = e + (r + s)\,I = e + (r + s)\,(i_d + i); \quad d = \frac{e}{i_d}; \quad \eta_e = \frac{ei}{EI}.$$

Chiffres pratiques. — Le rendement des dynamos varie avec leur puissance; il est d'autant plus faible que la puissance est elle-même moins considérable, les résistances passives prenant une importance relative plus grande.

Le tableau suivant (*) fournit les principaux chiffres relatifs aux machines modernes.

Puissance en kw. .	1	10	25	50	100	200	500	2 000
Rendement électrique en °/o.	75	87	91	94	95	96	98,25	99
Rendement commercial en °/o.	60	75	82	87	89	91	93,5	95
Poids en tonnes . .	0,33	2,22	5,72	11	20,9	40,7	93	352

Tableau de distribution. — Dans le but de faciliter les manœuvres, on relie le circuit de la ou des dynamos à ceux d'utilisation, au moyen d'un tableau de distribution (fig. 74) généralement en marbre, lequel porte les appareils de contrôle, ceux de sécurité et de manœuvre. A et B sont deux barres de cuivre en rapport avec les bornes de la dynamo par l'intermédiaire d'un ampèremètre I, d'un interrupteur N et d'un fusible de sûreté F_1. Un voltmètre V permet de mesurer la différence de potentiel existant entre ces barres, desquelles se détachent après passage par des fusibles F_2, F_3, F_4, F_5 et les interrupteurs N_1 et N_2, les circuits

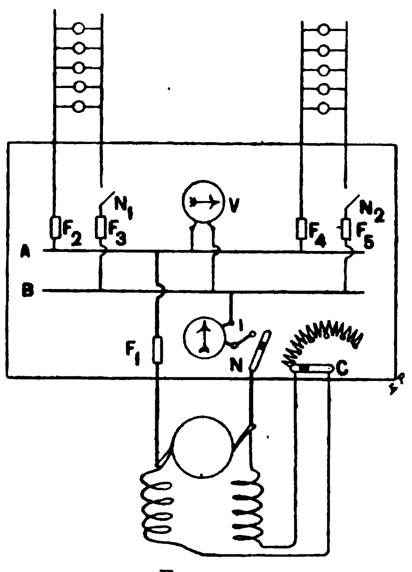


FIG. 74.

(°) HOSPITALIER, *Formulaire de l'électricien*, 1900-1901, p. 229.

d'utilisation. Enfin, un commutateur C permet d'insérer tout ou partie du rhéostat de champ magnétique, de manière à obtenir le voltage voulu entre A et B.

§ 4. — LES CARACTÉRISTIQUES.

Généralités. — Les conditions de fonctionnement des divers types de dynamos peuvent être très simplement mises en évidence au moyen de courbes appelées *caractéristiques* par M. Marcel Deprez, qui, le premier, en a montré l'utilité. On les obtient en traçant les diagrammes $e = f(i)$ à *vitesse constante* pour des régimes variés. La caractéristique à circuit ouvert, à la vitesse N tours par minute, est la courbe $E_o = f(i)$ obtenue en portant en abscisses les valeurs i du courant d'excitation, que l'on fait varier graduellement, et, en ordonnées, les valeurs correspondantes de la force électromotrice.

La force électromotrice à circuit ouvert est donnée par la relation

$$E_o = nN\mathcal{N} \, 10^{-8}.$$

Le nombre de fils périphériques de l'induit n étant forcément constant, si l'on assigne une valeur déterminée à $\mathcal{N}$, en gardant au courant traversant les inducteurs la même valeur, la force électromotrice à circuit ouvert ne dépendra plus que de la vitesse, en faisant abstraction de la valeur démagnétisante, très faible d'ailleurs, due aux courants de Foucault se développant dans les inducteurs et l'induit. Pour une autre valeur N′ de la vitesse, on aura

$$E'_o = nN'\mathcal{N} \, 10^{-8}, \quad \text{d'où} \quad \frac{E'_o}{E_o} = \frac{N'}{N} \quad \text{et} \quad E'_o = E_o \frac{N'}{N}.$$

Dès que l'on a tracé une caractéristique à circuit ouvert à la vitesse N, il sera aisé de tracer celle à la vitesse quelconque N′, en multipliant les ordonnées de la première par le rapport des deux vitesses.

La caractéristique *extérieure* donne la courbe de la force électromotrice relevée aux balais ou aux bornes (suivant le

type de machine), en fonction de l'intensité du courant dans le circuit extérieur ou d'utilisation.

La caractéristique *totale* fournit les valeurs des forces électromotrices développées dans l'induit en fonction du même courant extérieur ; elle se déduit de la précédente.

Les caractéristiques ne passent pas par l'origine des coordonnées, vu la présence du magnétisme rémanent dans les inducteurs, d'ailleurs indispensable pour l'amorcement. Elles ne s'en écartent toutefois pas beaucoup, le champ qui en résulte étant très faible.

Excitation indépendante. — Nous avons vu qu'à circuit ouvert, la force électromotrice est donnée par l'équation

$$E_0 = nN\mathcal{N}\, 10^{-8}.$$

$\mathcal{N}$ étant constant par hypothèse, puisque l'excitation est indépendante, à vitesse invariable la caractéristique à circuit ouvert sera représentée par l'horizontale AB (fig. 75), tirée à la distance E_0 de l'axe des abscisses.

Faisons maintenant débiter l'induit en partant d'une grande résistance extérieure, que nous diminuons progressivement, et mesurons, au moyen d'un ampèremètre inséré dans ce circuit et d'un voltmètre placé en dérivation sur les balais, les intensités I_1, I_2, I_3, ..., et les voltages e_1, e_2, e_3, ..., correspondant à ces divers régimes. Nous dresserons ainsi un tableau qui, traduit sous forme de courbe, nous donnera la caractéristique extérieure $e = f(I)$. C'est une courbe AC, partant de la valeur E_0 pour un courant nul (circuit ouvert, $R = \infty$) et assez fortement incurvée.

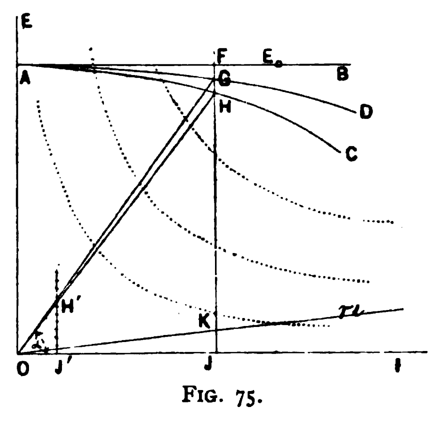


FIG. 75.

Aux divers régimes I_1, I_2, I_3, ..., la résistance (à chaud) r de l'induit provoque dans celui-ci les pertes de voltage rI_1, rI_2, rI_3, ... qui, ajoutées aux voltages existant aux balais, fournissent la force électromotrice totale développée aux dits régimes I_1, I_2, I_3, ... A l'extrémité des abscisses I_1, I_2, I_3, ..., élevons des ordonnées respectivement égales à $e_1 + rI_1$, $e_2 + rI_2$, ...; nous obtiendrons ainsi la caractéristique totale AD. C'est une courbe passant aussi par A (circuit ouvert) et s'infléchissant un peu moins que AC. Graphiquement, on l'obtiendra aisément en traçant la droite $e' = rI$, qui représente la perte dans l'induit. Il suffira alors de mener une ordonnée quelconque FJ, dont la portion KJ indiquera la perte dans l'induit quand celui-ci débite l'intensité OJ. En l'ajoutant à l'ordonnée HJ, donnant la différence de potentiel aux balais, on obtiendra la force électromotrice totale GJ. La différence $FG = E_0 - GJ$ donne la perte de voltage due à la réaction d'induit, puisque E_0 est la force électromotrice due à l'excitation seule, quand l'induit n'est le siège d'aucun courant, c'est-à-dire quand il n'y a pas de réaction d'induit.

Tirons la droite OH. Nous avons $HJ = OJ \operatorname{tg} \alpha$, ou $e = I \operatorname{tg} \alpha$ ou encore $\frac{e}{I} = \operatorname{tg} \alpha$. Mais en vertu de la loi d'Ohm, $\frac{e}{I} = R$. Donc, *la tangente de l'angle que fait la droite menée d'un point quelconque de la caractéristique extérieure à l'origine, avec l'axe des* I, *représente la résistance du circuit extérieur raccordé aux balais, pour le régime défini par les coordonnées du point considéré.*

De même, la tangente de l'angle de la droite OG avec l'axe des I donnera la valeur de la résistance *totale* du circuit.

On remarquera toutefois que les tangentes ne représentent les résistances que si les échelles adoptées pour mesurer les volts et les ampères sont égales. Quand les échelles sont différentes, on porte sur l'axe des I, à partir de l'origine, une longueur OJ′ correspondant à 1 ampère et l'on élève à l'extrémité une perpendiculaire indéfinie, divisée en longueurs égales à celle qui représente 1 volt. Cette droite devient l'échelle des résistances. L'intersection d'un vecteur quelconque avec cette ordonnée y intercepte un nombre de divi-

sions indiquant la résistance correspondante. On a alors, en effet,

$$\frac{HJ}{OJ} = r = \frac{H'J'}{OJ'} = H'J'.$$

Réciproquement, la résistance du circuit extérieur ou total étant donnée, il suffira, pour déterminer quelles sont alors les conditions de fonctionnement de la dynamo, de mener de l'origine une droite ayant pour coefficient angulaire la valeur de cette résistance, et d'abaisser l'ordonnée du point d'intersection avec la caractéristique extérieure ou totale, ce qui déterminera d'un coup la force électromotrice disponible ou totale et l'intensité du courant.

Posons maintenant EI = 1, puis 2, 3, ... kilowatts, et traçons les courbes correspondantes d'équipuissance, qui seront des hyperboles équilatères. Leurs points d'intersection avec les caractéristiques accuseront les facteurs pour lesquels la machine développe les puissances correspondantes.

On se rendra ainsi facilement compte, graphiquement, des conditions spéciales aux divers régimes que peut fournir la dynamo. Les rendements électriques, notamment, seront déterminés par le rapport des ordonnées des caractéristiques extérieures et totales.

Excitation en série. — A circuit ouvert, aucun courant ne passant dans l'enroulement d'excitation, la force électromotrice est nulle, à part celle, très faible, produite par le magnétisme rémanent. Lors du fonctionnement de la machine, le courant total traverse les inducteurs, le champ varie constamment avec la charge, et il est utile de se rendre compte de la force électromotrice, que l'induit développerait à circuit ouvert, pour les diverses valeurs que peut alors prendre l'excitation.

On déconnectera donc les inducteurs ; on les reliera à une source quelconque de courant et, faisant varier l'intensité du courant d'excitation par la suppression des résistances interposées, on mesurera, au moyen d'un voltmètre branché sur

les balais, les diverses forces électromotrices E_1, E_2, ..., correspondant aux régimes d'excitation i_1, i_2, ..., toujours à vitesse de rotation constante.

La courbe E_0, tracée (fig. 76) au moyen de ces valeurs, est précisément celle du magnétisme, sauf qu'elle part d'un point situé au-dessus de l'origine, à cause du magnétisme rémanent.

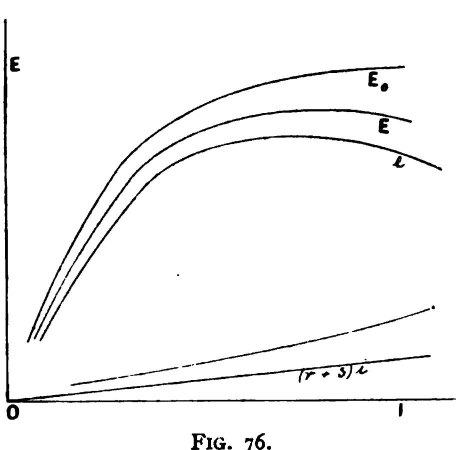


Fig. 76.

Il est à remarquer que les valeurs de la force électromotrice que l'on obtient pendant la période descendante du courant d'excitation sont supérieures à celles relevées pendant la période ascendante, par suite du phénomène d'hystérésis. Mais en dehors de cas tout à fait spéciaux, les différences sont pratiquement négligeables. Rétablissons maintenant les connexions normales, puis, l'induit tournant toujours à la même vitesse que précédemment, relevons les valeurs successives e_1, e_2, ..., du voltage aux bornes et les intensités I_1, I_2, ..., passant alors dans le circuit extérieur. La construction de la courbe $e = f(I)$ correspondante nous donne la caractéristique extérieure. Elle part sensiblement du même point que la précédente, mais reste en dessous. Au delà du coude de la première, elle s'infléchit par suite de la réaction d'induit.

Comme dans le cas précédent, les valeurs correspondantes e_1, e_2, ..., I_1, I_2, ..., nous permettent de calculer celles de la force électromotrice totale : $E = e + (r + s)I$, au moyen desquelles on tracera la caractéristique totale. La différence entre les ordonnées des caractéristiques à circuit ouvert et totale nous donnera encore l'effet de la réaction d'induit, et

le rapport des ordonnées de la caractéristique extérieure à celles de la seconde de ces courbes, les rendements électriques.

Enfin, si nous traçons la courbe résultant des différences entre les caractéristiques extérieure et à circuit ouvert, nous mettons en évidence, pour les divers régimes, l'influence de la réaction d'induit et de la chute de voltage dans l'induit, caractéristique *intérieure*.

La formule $E_0 = nN\mathcal{N} 10^{-8}$ montre qu'au facteur constant $nN\ 10^{-8}$ près, la caractéristique à circuit ouvert représente les flux en fonction des courants d'excitation.

La forme même de la caractéristique extérieure indique qu'il conviendra de faire fonctionner la dynamo dans la région sensiblement horizontale, un peu au delà du coude. En dehors de cette région, en effet, de faibles différences dans l'intensité du courant amèneraient de grandes variations dans le voltage, ce qui, ainsi que nous le verrons plus loin, nuirait au fonctionnement des récepteurs, s'il ne le compromettait entièrement.

Cependant, dans certains cas particuliers, la partie plongeante de la courbe trouve son utilisation, par exemple, quand la machine alimente des lampes à arc dont les charbons sont exposés à venir au contact. La chute de potentiel corollaire de l'élévation anormale d'intensité qui en résulte, empêche alors le courant d'atteindre une intensité dangereuse au point de vue de l'effet Joule.

Machine en dérivation. — La caractéristique à circuit ouvert (fig. 77) s'obtiendra, comme pour la machine précédente, en raccordant les inducteurs à une source de courant faisant varier son intensité et mesurant, pour chacune de ses valeurs, la différence de potentiel développée aux balais.

On rétablit ensuite les connexions et, l'induit tournant toujours à la vitesse constante choisie N, on mesure la force électromotrice aux balais à circuit ouvert ($R = \infty$). Puis, diminuant graduellement la résistance extérieure, on relève pour chaque régime l'intensité du courant utile et le voltage

correspondant aux balais, ce qui permet de tracer la caractéristique extérieure *e*. Celle-ci part de la valeur du voltage à circuit ouvert, s'infléchit graduellement par suite de la réaction d'induit, passe par un point de rebroussement et revient vers l'origine, en tournant sa convexité vers l'axe des I. Cette dernière partie ne peut se déterminer que sur certaines machines, car le régime devient alors instable.

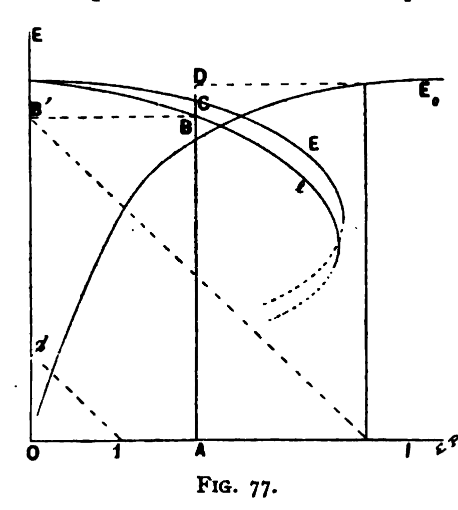


Fig. 77.

Le rebroussement de la courbe peut sembler étrange à première vue. Il est cependant aisément explicable. Lorsque la machine est mise en court-circuit, c'est-à-dire pour $R = 0$, l'excitation étant nulle, la force électromotrice et par suite le courant sont nuls. R augmentant, le courant va ensuite en augmentant dans le circuit extérieur, au fur et à mesure que l'intensité croissant dans les inducteurs, la force électromotrice augmente. Partons maintenant de $R = \infty$, le courant utile est nul. Puis, à mesure que R diminue, il augmente. Nous voyons donc que de $R = \infty$ à $R = 0$ le courant a augmenté, puis a diminué pour revenir à zéro. Il a nécessairement passé dans l'intervalle par un maximum.

La caractéristique totale s'obtient en ajoutant aux ordonnées de la caractéristique extérieure les voltages perdus dans l'induit par la circulation des courants, c'est-à-dire

$$Ir = (i + i_d)r = \left(i + \frac{e}{d}\right)r.$$

L'effet de la réaction d'induit pourra être déterminé en se rappelant qu'il représente la différence entre la force électro-

motrice que la machine donnerait à vide pour l'excitation du régime considéré et la force électromotrice qu'elle développe effectivement en charge.

Menons une ordonnée AB quelconque de la caractéristique extérieure. Elle marque le voltage aux balais quand le circuit extérieur est traversé par le courant OA. Le courant magnétisant les inducteurs sera pour ce régime

$$i_d = \frac{AB}{d}.$$

Il suffira de porter cette valeur à partir de l'origine sur l'axe des I, d'élever une perpendiculaire dont le segment délimité par la caractéristique à circuit ouvert donnera la force électromotrice à vide. La différence CD entre cette ordonnée et l'ordonnée AC de la caractéristique totale déterminera la réaction d'induit. La construction graphique s'effectue sans difficulté, en remarquant que i_d est une quatrième proportionnelle à d, AB et l'unité : on porte sur l'axe des I la longueur représentant l'unité (d'après les échelles adoptées pour le volt et l'ampère, l'échelle des ohms pouvant être arbitraire), sur l'axe des E la longueur représentant la résistance d des inducteurs, on joint les deux extrémités, puis, ayant reporté sur l'axe des E la longueur $OB' = AB$, on mène par B' une parallèle à $1d$. Au point d'intersection avec l'axe des I, on tire l'ordonnée de la caractéristique E_0 qui fournit la force électromotrice à vide.

Les mêmes considérations que précédemment, relatives aux résistances et aux puissances, seraient encore d'application ici. La stabilité de fonctionnement exige que la machine travaille suivant la branche supérieure de ses caractéristiques.

CHAPITRE VII

ÉLECTROMOTEURS

Lorsqu'on connecte une dynamo avec une source d'électricité à différence de potentiel constante et moyennant les précautions que nous indiquerons ci-après, on constate que l'induit se met à tourner. Son mouvement s'accélère jusqu'au moment où les résistances passives font équilibre au couple moteur. Si l'on observe, d'autre part, l'aiguille d'un ampèremètre inséré dans le circuit d'utilisation, on remarque que, très intense au début, le courant diminue graduellement, ce qui indique la production d'une force contre-électromotrice croissant avec la vitesse.

§ 1. — CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES : PUISSANCE, COUPLE, RENDEMENT.

Abstraction faite de toute hypothèse quant au mode de production du flux inducteur, considérons un induit à anneau fonctionnant d'abord comme générateur de courant et tournant dans le sens de la flèche 1 (fig. 78).

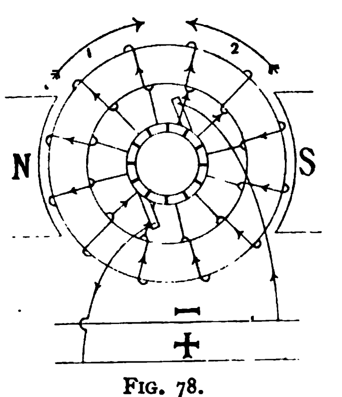


Fig. 78.

Le courant engendré se distribuera comme les flèches l'indiquent. L'intensité I circule dans le circuit extérieur ; $\frac{I}{2}$ dans les deux moitiés de l'induit.

Supposons maintenant que nous envoyions dans la machine un courant de mêmes sens et intensité que celui qu'elle produisait comme dynamo. La distribution du courant et des flux magnétiques s'établira encore exactement de la même

manière qu'auparavant. Toutefois, les spires tendant à faire entrer un flux maximum par leur face négative (celle par laquelle entrent les lignes de force développées par le courant qui les parcourt) ou, ce qui revient au même, à réduire le flux inducteur entrant par leur face positive, il est facile de voir que l'induit va être sollicité à tourner en sens inverse (flèche 2). L'application des diverses règles rappelées dans les préliminaires, notamment la règle des trois doigts, nous conduirait à la même conclusion.

Pour éviter le broutement du collecteur, les balais devront être retournés. On remarquera qu'ils se trouvent calés en arrière du mouvement, et symétriquement placés par rapport à la ligne neutre, à même régime de fonctionnement. On règle d'ailleurs leur position jusqu'à obtenir le minimum d'étincelles.

Courant absorbé, puissance et couple. — L'induit se déplaçant en sens inverse du mouvement qu'il avait dans le fonctionnement en générateur, et le champ magnétique étant resté le même, la force électromotrice induite sera de sens inverse à celle que la dynamo développait, c'est-à-dire opposée à la différence de potentiel E qu'il faut appliquer à la machine, pour la faire traverser par le même courant que précédemment.

Nous trouvons donc une force électromotrice E appliquée aux extrémités de la résistance r de l'induit et, dans ce dernier, la force contre-électromotrice e. En vertu de la loi d'Ohm, l'intensité du courant traversant le système sera

$$i = \frac{E - e}{r}, \qquad (1)$$

d'où nous tirons, en multipliant les deux membres par i :

$$i^2 r = Ei - ei \quad \text{ou} \quad Ei - i^2 r = ei.$$

Le terme $i^2 r$ représente la puissance dissipée par effet Joule dans l'induit; $Ei = P$ est la puissance électrique dépensée aux bornes. En faisant abstraction des pertes se produisant

dans l'induit (frottements dans les coussinets et dans l'air, hystérésis et courants de Foucault), la différence doit nécessairement représenter la fraction de la puissance électrique qui s'est transformée en puissance mécanique. Donc

$$ei = p.$$

Mais, en appelant $\mathfrak{N}$ le flux traversant l'induit, N le nombre de révolutions par seconde et n le nombre de spires, nous savons que la force électromotrice d'induction développée $e = n\text{N}\mathfrak{N}$. Donc, en unités CGS,

$$p = ie = in\text{N}\mathfrak{N}. \qquad (2)$$

L'induit s'est mis à tourner sous l'influence d'un couple moteur dont nous représentons par C la valeur quand le régime est atteint. A ce moment, le travail par tour est $2\pi\text{C}$ et la puissance $2\pi\text{CN}$. C'est une seconde expression de la puissance mécanique développée. En l'égalant à la première, il vient

$$2\pi\text{CN} = in\text{N}\mathfrak{N}, \qquad \text{d'où} \qquad \text{C} = \frac{in\mathfrak{N}}{2\pi}. \qquad (3)$$

Telles sont les trois équations liant les divers facteurs électriques de l'électromoteur.

N nombre de tours par seconde ayant disparu de l'équation (3), on voit qu'en négligeant les effets parasites, le couple moteur est indépendant de la vitesse ; il n'est fonction que de l'intensité du courant.

Rendement. — Enfin, le rendement industriel théorique de l'appareil sera représenté par

$$\frac{p}{\text{P}} = \frac{ei}{\text{E}i} = \frac{e}{\text{E}} = \frac{\text{E} - ir}{\text{E}}.$$

Fonctionnement théorique. — Voyons maintenant quelles sont les variations des facteurs électriques concurremment avec celles du couple résistant, et supposons d'abord celui-ci suffisant pour maintenir l'induit immobile.

Le courant qui traverse ce dernier est alors

$$I = \frac{E}{r}.$$

Il est maximum, car aussitôt que l'induit se met à tourner, la force contre-électromotrice vient diminuer la valeur du numérateur. Dans le cas envisagé, le moteur ne restituant aucun travail, le rendement est nul.

Lorsque le couple résistant est plus faible que le couple moteur, l'induit démarre et sa vitesse s'accélère jusqu'à ce que l'accroissement des résistances diverses dues au mouvement de l'induit compense l'excédent du couple moteur. Au fur et à mesure que la vitesse de l'induit augmente, e s'amplifie.

La puissance

$$p = ei = \frac{e(E - e)}{r}$$

commence par croître. Elle atteint un maximum obtenu en prenant la dérivée $\frac{dp}{de}$, l'égalant à zéro et s'assurant que $\frac{d^2p}{de^2} < 0$. On trouve $e = \frac{E}{2}$, ce qui donne pour valeur correspondante du courant, en portant cette expression dans l'équation (1),

$$i = \frac{E}{2r}.$$

La puissance restituée est donc maximum quand, le courant absorbé étant la moitié de celui qui traverserait l'induit maintenu immobile, celui-ci tourne à une vitesse telle qu'il développe une force contre-électromotrice exactement égale à la moitié de la différence de potentiel appliquée.

Lorsque la puissance est maximum, le rendement a pour valeur

$$\frac{E}{2E} = 50 \%.$$

Si le couple résistant décroît indéfiniment, e continue à croître, i diminue, la puissance est de plus en plus réduite, pour arriver à zéro quand $e = E$, puisque alors le courant est nul.

Traçons les diagrammes. Portons sur un axe horizontal (fig. 79) des longueurs proportionnelles à e et à leurs extrémités des ordonnées proportionnelles à

$$P = Ei = \frac{E(E-e)}{r}.$$

Pour $e = 0$, nous avons $P = EI$, valeur maximum. Pour $e = E$, $P = 0$. La droite représentative passe par le point E.

La courbe des puissances restituées est

$$p = ei = \frac{e(E-e)}{r}.$$

Fig. 79.

Pour $e = 0$, $p = 0$, la courbe passe par l'origine. Pour $e = E$, $p = 0$, la courbe passe aussi par E. Nous savons que pour $e = \frac{E}{2}$, la valeur de p est maximum et que le rendement est alors égal à 50 %. Élevons donc à l'abscisse $\frac{E}{2}$ une perpendiculaire et prenons la moitié de l'ordonnée correspondante P, nous aurons encore un point de la courbe. La tangente en ce point $\frac{E}{2}$ est, comme nous le savons, horizontale, puisque son coefficient angulaire $\frac{dp}{de} = 0$. La courbe est d'ailleurs une parabole que nous pourrons aisément décrire.

Traçons enfin la courbe des rendements

$$\eta_i = \frac{ei}{Ei} = \frac{e}{E}.$$

Nous voyons que c'est également une droite passant par l'origine et par un point dont l'ordonnée à l'abscisse E est 1. Partant de zéro, le rendement croît graduellement et peut théoriquement atteindre l'unité, mais à ce moment la puissance est nulle. Il sera donc avantageux que le moteur fonctionne sur la seconde moitié de la courbe des p, de manière que le rendement soit suffisant. C'est ce qu'il réalisera d'ailleurs automatiquement de lui-même, puisque après

démarrage le couple résistant garde sensiblement la même valeur (à part le couple des résistances passives), tandis que le couple moteur augmentant jusqu'au maximum, produit une accélération croissante de l'induit qui dépasse le point de maximum et ne peut plus dès lors arriver à équilibrer le couple résistant, plus faible, qu'en accélérant encore sa vitesse

La marche aux environs de la puissance maximum n'est pas avantageuse, vu le faible rendement qu'elle procure. Mais il y a plus. Elle ne peut être admise qu'exceptionnellement et pendant quelques instants, au démarrage par exemple, à cause du courant très intense que la machine absorbe alors. La section des conducteurs n'est en effet calculée, par raison d'économie, que pour supporter, d'une manière permanente, le courant correspondant à la puissance normale.

Fonctionnement pratique. — Les diagrammes de la figure 79 correspondent à un cas théorique, dont on se rapproche d'autant plus que la puissance des machines est plus considérable, le rendement croissant avec la puissance. En pratique, on s'en écarte donc plus ou moins. La puissance électrique p se trouve réduite de certains déchets : mécaniques, magnétiques et électriques. L'induit doit en effet vaincre les frottements des coussinets, de la résistance de l'air; enfin, l'hystérésis et les courants de Foucault absorbent une partie de la puissance disponible qui se dissipe en chaleur, de sorte que la puissance mécanique *utile* p_u que l'on peut recueillir sur l'axe, n'est qu'une fraction plus ou moins grande (en général relativement grande cependant) de p. Le rendement industriel ou commercial devient

$$\eta_i = \frac{p_u}{P} = \frac{p_u}{Ei}.$$

Il est utile de le connaître, pour une machine donnée, aux diverses puissances qu'elle est susceptible de développer. Pour effectuer cette détermination, on monte sur l'axe de l'induit un frein de Prony, qu'on charge progressivement, et l'on mesure pour chaque charge, au moyen d'un ampère-

mètre inséré dans le circuit d'un voltmètre branché en dérivation sur les balais et d'un compte-tours, le voltage, l'intensité du courant absorbé et la vitesse de rotation de l'induit. On a alors tous les éléments pour dresser les diagrammes de la puissance électrique dépensée, de la puissance mécanique recueillie et du rendement industriel en fonction de la vitesse.

On obtient des courbes analogues à celles de la figure 80, dans laquelle nous reconnaissons les trois courbes théoriques de la figure 79, plus ou moins étalées.

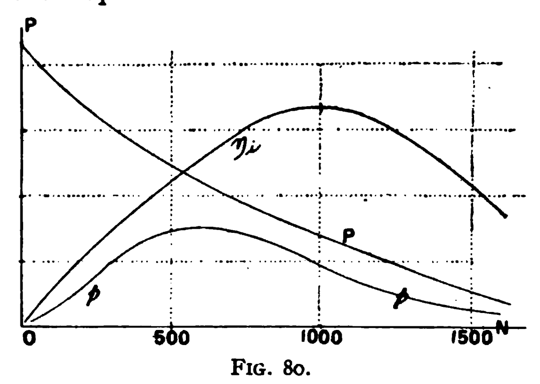


FIG. 80.

Il est à remarquer que le diagramme des rendements montre que ceux-ci gardent des valeurs élevées et peu différentes pour une série de vitesses comprises entre de larges limites, propriété extrêmement précieuse des moteurs électriques.

Renversement du sens de la rotation. — Si l'on renverse le courant dans l'induit, les faces négatives des spires vont devenir positives et réciproquement, de sorte que les réactions électromagnétiques s'inversant, l'induit tournera en sens contraire.

Rendement dans le fonctionnement en générateur et en moteur. — Il est intéressant de comparer le rendement dans les deux cas du fonctionnement en générateur et en moteur. Soit un induit en résistance r traversé par un courant $I = i$ et développant la même force électromotrice $E = e$, qu'il fonctionne en générateur ou en moteur.

Le rendement du générateur est le rapport de la puissance aux bornes $EI - I^2r$ à la puissance dépensée pour le faire tourner $EI + a$. a comprenant les frottements mécaniques,

la perte d'énergie due à l'hystérésis et aux courants de Foucault

$$\eta_g = \frac{EI - I^2r}{EI + a}.$$

Le rendement du moteur s'obtient en faisant le rapport de la puissance récupérable sur son axe, soit $ei - a$ à la puissance électrique totale dépensée à ses bornes $ei + i^2r$ soit, puisque $i = I$ et $e = E$ par hypothèse,

$$\eta_m = \frac{EI - a}{EI + I^2r}.$$

La différence

$$\eta_g - \eta_m = \frac{a^2 - (I^2r)^2}{(EI + a)(EI + I^2r)}$$

sera positive ou négative, c'est-à-dire que le rendement du générateur sera supérieur ou inférieur à celui du moteur, selon que a est $\gtrless I^2r$.

D'après les chiffres de rendement donnés précédemment, on constate d'abord que dans les machines puissantes, a et I^2r n'équivalant ensemble qu'à quelques °/₀ de la puissance totale, leur différence est très faible. Toutefois, a est en général inférieur à I^2r, ce qui assigne un rendement légèrement plus élevé au moteur. On s'explique aisément cette différence, par le fait que les courants de Foucault dans le fer du moteur sont de sens opposé aux courants de circulation dans le fil induit, ce qui tend à affaiblir les flux transversaux et à diminuer le décalage.

Équations fondamentales. — Les équations trouvées plus haut,

$$i = \frac{E - e}{r} \quad (1), \qquad p = ie = inN\mathcal{N} \quad (2), \qquad C = \frac{in\mathcal{N}}{2\pi} \quad (3),$$

vont nous permettre d'examiner les conditions de fonctionnement des divers genres d'électromoteurs.

Pour la clarté des discussions qui suivent, nous allons exprimer plus explicitement certains de leurs facteurs en fonction d'autres.

En remplaçant dans (3) i par sa valeur (1) et e par l'expression équivalente $n\mathrm{N}\mathcal{N}$, nous trouverons une relation entre le nombre de tours, le couple et le flux

$$\mathrm{N} = \frac{n\mathcal{N}\mathrm{E} - 2\pi r\mathrm{C}}{n^2\mathcal{N}^2}. \qquad (4)$$

Enfin, substituant dans (1) la valeur de e, nous tirerons l'expression du nombre de tours en fonction du flux et du courant

$$\mathrm{N} = \frac{\mathrm{E} - ir}{n\mathcal{N}}. \qquad (5)$$

§ 2. — DIVERS TYPES D'ÉLECTROMOTEURS ET LEUR FONCTIONNEMENT.

Le phénomène de réversibilité des dynamos étant général, on peut rencontrer, fonctionnant en électromoteurs, les divers types de générateurs étudiés précédemment. En outre, comme les distributions d'électricité se font soit à intensité, soit sous tension constantes, nous aurons chaque fois à examiner les modifications qu'apportent ces deux systèmes d'alimentation dans la répartition du courant entre les divers organes de la dynamo ainsi que les variations du champ inducteur et du couple qui s'ensuivent.

Rhéostats de démarrage. — Remarquons d'abord qu'on ne peut passer d'un régime à un autre très différent, qu'en prenant certaines précautions. Au démarrage, par exemple, dans le cas de distributions sous tension constante, le courant pourrait prendre une intensité dangereuse, provoquant, en outre, une baisse notable de voltage dans les canalisations. Il est donc nécessaire d'interposer des résistances, que l'on retire graduellement au fur et à mesure que la vitesse de l'induit augmentant, la force contre-électromotrice s'amplifie.

RHÉOSTATS LIQUIDES. — On emploie parfois, par raison d'économie, un dispositif à liquide dans lequel deux pièces

ou séries de pièces en fer A, B (fig. 81), raccordées, respectivement aux conducteurs d'amenée et de départ du courant, isolées l'une de l'autre et commandées par un levier, une manivelle et, éventuellement, des engrenages pour éviter les à-coups, plongent dans un bain de carbonate de soude dissous dans l'eau. Quand les pièces mobiles sont à fond de course, des mâchoires métalliques M_1M_2 les mettent en court-circuit.

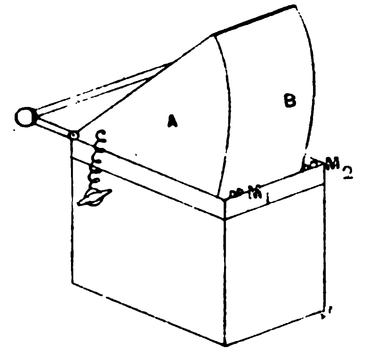


FIG. 81.

Les inconvénients de ces rhéostats sont que les pièces métalliques se dissolvent à la longue dans le liquide et que celui-ci s'évapore. En outre, quand la tension est élevée, de fortes étincelles jaillissent à sa surface.

RHÉOSTATS MÉTALLIQUES A BOUDINS. — Les rhéostats métalliques à boudins sont meilleurs et plus employés. Ils consistent généralement en un cadre de fer CCCC (fig. 82) supportant une résistance R roulée en spirales ou boudins suspendus verticalement, soutenus à leur partie supérieure par des isolateurs en porcelaine et fixés à leurs extrémités inférieures dans des plots isolés, disposés en arc de cercle, sur lesquels vient appuyer un levier de contact D. Les touches sont assez rapprochées pour que le levier ne quitte pas l'une d'elles sans déjà reposer sur la suivante.

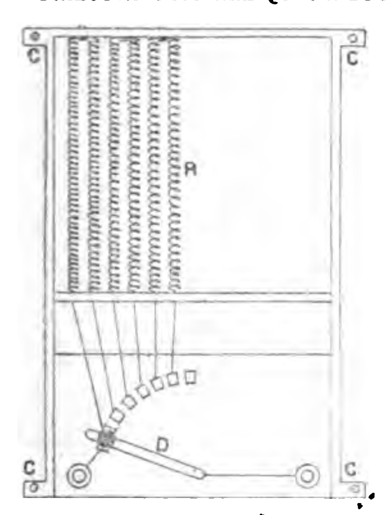


FIG. 82.

Rhéostats émaillés. — On utilise beaucoup, actuellement, des rhéostats émaillés, comportant une lame très mince de métal résistant (0,05 millimètre d'épaisseur environ) et de largeur proportionnée au courant qui doit la traverser. Cette lame, repliée en bandes ondulées parallèles (fig. 83), est noyée dans un émail isolant coulé à l'intérieur d'une auge métallique. La faible épaisseur de la bande empêche la rupture de l'émail sous l'effet des dilatations. Les coefficients de dilatation du métal et de l'émail sont d'ailleurs extrêmement voisins.

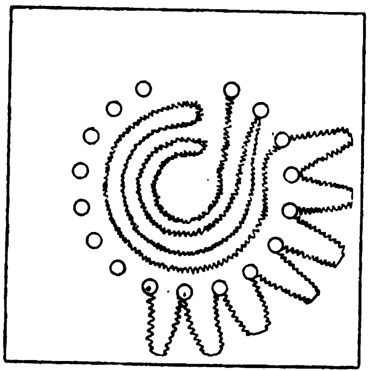


Fig. 83.

Moteurs magnéto et à excitation indépendante. — I constant. — $\mathcal{N}$ étant constant, à part l'effet d'ailleurs faible de la réaction d'induit, l'équation (3) indique que le couple est constant et cela à toutes les vitesses (ligne traits et points, fig. 84).

E = constant. — $\mathcal{N}$ étant constant sous la réserve ci-dessus, l'équation (4) montre que le diagramme des vitesses en fonction du couple est une droite (trait plein, fig. 84).

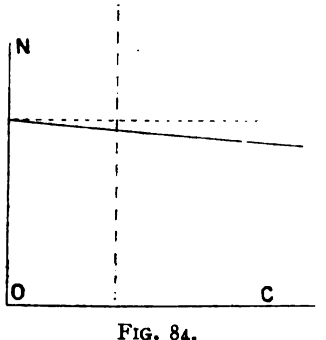


Fig. 84.

Pour $C = 0$, $N = \frac{E}{n\mathcal{N}}$.

La droite passe sous l'horizontale menée par ce point vu son coefficient angulaire négatif, mais elle est très peu inclinée, à cause de la petitesse de $\frac{2\pi r}{n^2\mathcal{N}^2}$. La vitesse est donc sensiblement constante à toutes charges.

Il conviendra de n'admettre le courant que progressivement, par l'intermédiaire d'un rhéostat de démarrage.

Moteur série. — I CONSTANT. — Si les barres + et — (fig. 85) sont embrochées en série dans une canalisation dont l'intensité du courant est maintenue constante, on voit que le courant traversant les inducteurs et l'induit reste constant. Le champ $\mathcal{M}$ ne se modifie pas et la valeur du couple (3) reste invariable (traits barres et points, fig. 86).

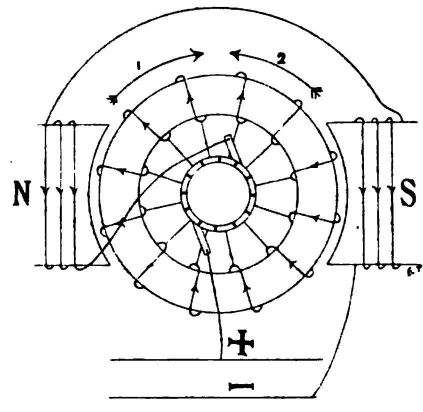


FIG. 85.

Par conséquent, le moteur ne démarre que pour autant que le couple moteur soit supérieur au couple résistant. Si la charge diminue, la vitesse s'accélère jusqu'à ce que les résistances passives, qui sont fonction de la vitesse, compensent la diminution de charge. Pour une charge nulle, la vitesse peut devenir excessive.

L'indépendance du couple et de la vitesse se met aisément en évidence, comme l'a fait M. Marcel Deprez, en fixant sur la poulie d'un moteur série, un frein de Prony chargé d'un poids fixe. En appliquant à la machine une différence de potentiel croissante, on constate que le courant croît jusqu'au moment où l'induit se met en mouvement, c'est-à-dire jusqu'au point où le couple moteur vainc le couple résistant. Le courant garde alors une valeur invariable, et les renforcements de la force électromotrice appliquée ne provoquent plus qu'une accélération de la vitesse.

MODIFICATION DE LA VITESSE. — A chaque régime correspond une vitesse déterminée et l'on ne pourra modifier celle-ci qu'en agissant sur le flux $\mathcal{M}$ (5), soit en diminuant ou augmentant le nombre de spires actives des inducteurs, soit, système Thury, en shuntant l'inducteur par une résistance variable.

E CONSTANT. — Si maintenant les deux barres + et — (fig. 85) sont maintenues sous tension constante, le courant

et, par suite, le champ seront maxima au démarrage. Pour ce double motif, le couple C est maximum et extrêmement énergique. Puis, au fur et à mesure que la vitesse s'accélère, la force contre-électromotrice augmente et le courant diminue. Le régime s'établit quand le couple moteur équilibre le couple résistant. Le couple diminue donc rapidement avec la vitesse (trait plein, fig. 86).

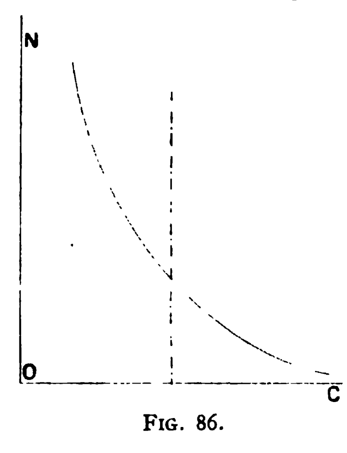


FIG. 86.

Si la charge disparaît, le moteur s'emballe. En effet, l'équilibre entre le couple résistant très faible même à de grandes vitesses, et le couple moteur, ne peut être obtenu que par la réduction de ce dernier, ce qui exige que i et par suite le champ soient faibles. Or i ne peut diminuer que moyennant augmentation de la force contre-électromotrice (1), ce qui exige que l'induit prenne des vitesses de rotation excessives, puisque le flux diminue avec i.

Cet inconvénient ne se produit pas dans les petits moteurs, où les résistances passives sont relativement élevées, mais l'intégrité des grandes machines pourrait se trouver compromise; aussi l'emploi des moteurs série fonctionnant sous potentiel constant est limité à quelques cas spéciaux, comme celui des tramways, où leur énergique couple de démarrage est particulièrement utile.

MODIFICATION DE LA VITESSE. — Nous venons de voir qu'en modifiant la différence de potentiel appliquée aux bornes du moteur série, la vitesse se modifie parallèlement. Sous potentiel constant, on réalisera cette modification en plaçant en série, avec la machine, des résistances que l'on supprimera partiellement ou totalement, à volonté.

Il existe un second moyen d'atteindre le même résultat. De l'équation (5)

$$N = \frac{E - ir}{n\mathcal{N}},$$

nous tirons, puisque le flux $\mathfrak{N} = ki$,

$$N = \frac{E - \frac{\mathfrak{N} r}{k}}{n\mathfrak{N}},$$

et l'on voit qu'en réduisant le flux, la vitesse augmentera pour deux raisons : 1° parce que le terme soustractif du numérateur diminue et 2° parce que le dénominateur diminue. Réciproquement, si le flux augmente, le nombre de tours est réduit.

Le moyen le plus employé pour modifier le flux, consiste à shunter l'enroulement inducteur par une résistance variable.

Renversement du sens de rotation. — Quand on renverse le courant dans une canalisation alimentant un moteur série, on remarque que, si les faces négatives des spires sont devenues positives et réciproquement, d'autre part, la direction du champ inducteur s'est inversée également, de sorte que les réactions électromagnétiques restent les mêmes et l'induit continue à tourner dans le même sens. .

Pour intervertir sa rotation, il y a donc lieu, solution générale, de ne renverser le courant que soit dans l'inducteur, soit dans l'induit. On évïtera de grandes réactions inductives en produisant avant renversement l'extinction graduelle du courant au moyen de rhéostats appropriés et en augmentant de même, progressivement, l'admission du courant inverse.

Dans le cas où les changements de rotation ou de régime sont fréquents, comme dans les tramways, on s'affranchira de tout décalage des balais, par l'emploi de frotteurs en charbon qui se fixent perpendiculairement au collecteur. Les machines série, comme nous l'avons fait remarquer, maintiennent d'ailleurs leur ligne neutre invariable, à peu près à toutes charges.

Moteurs en dérivation. — I constant. — Lorsqu'on introduit un tel moteur dans une canalisation à courant constant

(fig. 87), l'induit étant extrêmement peu résistant absorbera un courant i presque égal au courant total. L'intensité i_d passant dans les inducteurs est par conséquent minime, ainsi que le flux et le couple moteur

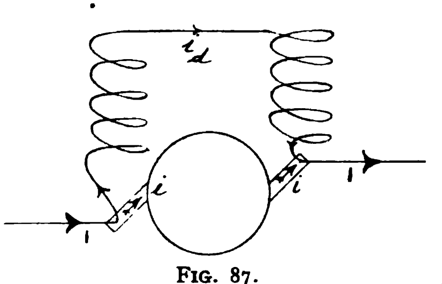


Fig. 87.

$$C = \frac{in\mathfrak{N}}{2\pi}.$$

Si néanmoins le couple résistant est plus faible que celui-ci, l'induit démarre et la force contre-électromotrice qu'il développe augmentant avec la vitesse, force une partie de plus en plus grande du courant à passer par les inducteurs, ce qui augmente le champ et par suite le couple.

Si au contraire le couple résistant est plus grand que le couple moteur initial, il y aura lieu d'introduire en série, avec l'induit, une résistance qui amplifiera suffisamment le courant inducteur pour provoquer le démarrage, et que l'on retirera ensuite peu à peu.

Quoi qu'il en soit, le couple croîtra. En vertu de la première loi de Kirchhoff,

$$i + i_d = \mathrm{I}.$$

Tant que l'on n'aura pas atteint le coude de la courbe du magnétisme, on pourra écrire

$$\mathfrak{N} = ki_d,$$

k étant une constante.

En remplaçant i et $\mathfrak{N}$ par leur valeur dans l'expression du couple, il vient

$$C = \frac{(\mathrm{I} - i_d)nki_d}{2\pi} = k_1(\mathrm{I} - i_d)i_d.$$

Nous trouvons dans l'expression du couple le produit de deux facteurs variables dont la somme est constante. Le produit est maximum quand les deux facteurs sont égaux, c'est-à-dire quand $i_d = \frac{\mathrm{I}}{2}$. Donc, la valeur du couple atteindra son maximum quand le courant se bifurque par parties égales

dans l'induit et les inducteurs. La vitesse de l'induit continuant à s'accélérer, une partie de plus en plus grande du courant passera dans les inducteurs, de sorte que le couple diminuera par réduction de i, l'augmentation de $\mathcal{N}$ se réduisant de plus en plus quand on approche de la saturation.

En résumé, le diagramme du couple en fonction de la vitesse affectera la forme de la courbe en traits et points de la figure 88.

E CONSTANT. — Soumises à une différence de potentiel constante, les spires inductrices seront traversées par un courant maximum et par suite développeront un flux considérable; l'induit, tout en ayant soin d'intercaler un rhéostat de démarrage, laissera passer un courant intense; le couple sera maximum au démarrage. Puis, au fur et à mesure que la vitesse augmente, la force contre-électromotrice réduit le courant dans l'induit (1), le couple diminue (3) et se proportionne à l'effort résistant.

La vitesse restera à peu près constante à toutes charges, car, d'après l'équation (5), lorsque i augmente, la réaction d'induit s'amplifie et réduit le flux $\mathcal{N}$ traversant l'armature, de sorte que le numérateur et le dénominateur de N diminuant simultanément, ce dernier varie peu, trait plein (fig. 88).

Le moteur shunt est donc autorégulateur, qualité précieuse, qui a fait multiplier son emploi dans les applications industrielles. En outre, si son couple résistant change de signe, c'est-à-dire devient moteur, e prend une influence prépondérante, le courant se renverse dans l'induit, mais non dans les inducteurs, de sorte que le moteur se transforme en générateur fournissant de l'énergie à la canalisation qui l'alimentait. Cette récupération est, cela va sans dire, essentiellement économique.

N

O C

FIG. 88.

Modification de la vitesse. — Pour des raisons semblables à celles déduites dans l'étude du moteur série, on augmentera ou diminuera la vitesse en diminuant ou renforçant le champ inducteur, ce qui se fera en agissant sur le rhéostat dont sont toujours pourvues les installations de moteurs.

Renversement du sens de rotation. — On intervertira, comme toujours, le sens du courant dans l'induit seul, mais ici une remarque est à faire. Si le courant vient à être renversé dans une canalisation alimentant un moteur en dérivation, le sens du courant est bien interverti dans l'induit, mais non dans les inducteurs, de sorte que l'armature se mettra à tourner en sens inverse, contrairement à ce qui se passe pour le moteur série.

Schéma d'une installation. — A titre d'exemple, donnons le schéma de l'installation d'un moteur. Les conducteurs d'amenée du courant aboutissent, par l'intermédiaire d'un tableau de distribution et après passage par un fusible F, à deux barres A et B (fig. 89), desquelles se détachent, d'une part, un conducteur se rendant à l'ampèremètre I et à la manette C du rhéostat de démarrage; d'autre part, à un conducteur se raccordant au balai d'où bifurquent l'induit et l'enroulement inducteur.

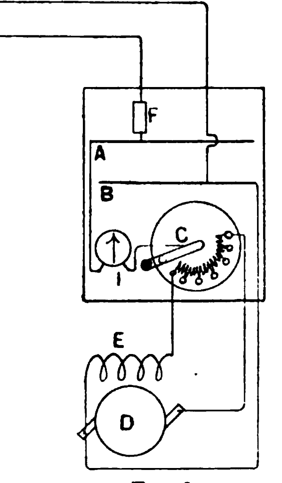


Fig. 89.

Dans la position figurée, aucun courant ne passe dans l'installation. Dès que l'on déplace vers la droite la manette C, le courant est admis dans les inducteurs et, par l'intermédiaire du rhéostat, dans l'induit. En continuant le mouvement de déplacement vers la droite, la résistance est graduellement retirée de l'induit.

Souvent il existe deux groupes de résistances dont le second permet, après avoir supprimé celui en série avec l'induit, de faire varier la résistance mise en série avec l'enroulement inducteur, de manière à modifier la vitesse à volonté.

Moteurs compounds. — ENROULEMENTS CONCORDANTS. — Les machines compounds, étudiées précédemment, ont des caractéristiques mécaniques qui tiennent naturellement le milieu entre celles du moteur série et du moteur shunt. A potentiel constant, notamment, le diagramme de la vitesse en fonction du couple sera une courbe AB (fig. 90) peu incurvée et assez fortement inclinée sur l'axe des C. Ces machines sont donc irrégulières, mais elles conviennent particulièrement bien quand la source d'électricité est incapable de maintenir une différence de potentiel constante au démarrage. L'enroulement en dérivation seul est insuffisant et celui en série vient à propos le renforcer, pour donner au couple la grande valeur initiale nécessaire.

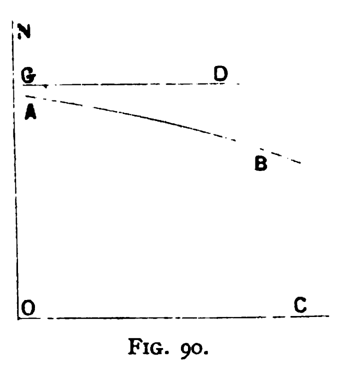


FIG. 90.

ENROULEMENTS DIFFÉRENTIELS. — Si l'application que l'on a en vue exige une très grande constance de la vitesse, on emploiera une machine compound à enroulements différentiels, c'est-à-dire dont l'enroulement série agit en sens inverse de l'enroulement dérivé.

En effet, l'équation (5)

$$N = \frac{E - ir}{n \mathcal{N}}$$

montre que, le numérateur diminuant par augmentation de i, la constance de N ne peut être obtenue qu'en réduisant proportionnellement le dénominateur également, c'est-à-dire $\mathcal{N}$. On enroulera donc les spires en série en sens inverse de l'enroulement en dérivation, et dès lors le diagramme peut devenir une droite GD (fig. 90) parallèle à l'axe des C.

Certaines précautions devront être prises au démarrage, à cause de la grande intensité traversant les spires en série qui pourrait renverser le champ et faire démarrer le moteur en sens inverse. On supprimera donc l'effet de l'enroulement série en le mettant en court-circuit à la mise en marche, ou,

mieux encore, on y renversera à ce moment le courant, pour ne rétablir les connexions normales que lorsque la marche régulière est obtenue.

Puissance approximative d'un moteur. — M. Snell a établi les formules suivantes, donnant la puissance mécanique approximative disponible sur l'axe d'un moteur :

$P = 0{,}03\ ld^2N$ watts pour les machines à anneau ;
$P = 0{,}045$ » » » à tambour.

Projet d'installation d'un moteur. — Un cas se présentant souvent est celui du remplacement de toute une installation mécanique : arbres, poulies et courroies, par un moteur actionnant directement l'arbre de couche principal de l'atelier.

De la puissance dépensée pour entraîner le tout, on pourra aisément déduire la puissance nécessaire à la partie de la transmission qui subsiste. On connaîtra, d'autre part, la vitesse de rotation à assurer, ce qui fournit les éléments permettant de déterminer les facteurs électriques du moteur à commander.

Exemple. — *Supposons qu'il faille installer un moteur de dix chevaux dans un atelier.*

Imposons-lui un rendement de 0,75. Pour qu'il reste 10 chevaux ou 7 360 watts disponibles sur l'axe moteur, nous devons en dépenser $\frac{7\,360}{0{,}75} = 9\,814$ aux bornes de la machine.

En admettant que l'usine où doit être installé le moteur possède une machine d'éclairage de puissance suffisante au voltage de 220 volts, et que nous perdions 5 °/₀ de voltage dans la canalisation reliant la dynamo au moteur, il restera $220 \cdot 0{,}95 = 208$ volts aux bornes du moteur.

Comme celui-ci doit absorber 9 814 watts pour satisfaire au problème, il devra nécessairement être traversé par un courant de $\frac{9\,814}{208} = 47{,}2$ ampères.

On commandera donc une dynamo de 0,75 de rendement industriel, fournissant 210 volts et 50 ampères. On amènera la vitesse au taux voulu, au moyen de dispositifs mécaniques appropriés aux circonstances locales.

CHAPITRE VIII

COUPLAGE ET ESSAI DES DYNAMOS

§ 1. — COUPLAGE.

La consommation d'énergie dans une usine électrique est généralement très irrégulière. A certaines heures la demande est extrêmement faible, pour atteindre à d'autres une grande valeur. Si donc on ne desservait l'usine que par une seule grande machine, celle-ci ne fonctionnerait la plupart du temps qu'à faible charge, c'est-à-dire dans de mauvaises conditions de rendement. Il y a lieu, pour obtenir un rendement moyen convenable, de subdiviser la puissance maximum que la station doit être à même de développer en un certain nombre d'unités d'importance moyenne. On les met successivement en service suivant nécessité.

Au point de vue électrotechnique proprement dit, la question qui se pose alors est de mettre en activité sur le réseau de nouvelles dynamos, sans apporter aucune perturbation dans le fonctionnement général. En principe il faut que, par la disposition adoptée, le sens du courant d'excitation d'une quelconque des machines conjuguées ne puisse jamais s'intervertir.

Dynamos série. — Le couplage des dynamos série, en tension, ne présente aucune difficulté (fig. 91).

Pour le groupement en dérivation (fig. 92), il faut remarquer que si la vitesse de l'une d'elles fléchissait au point que sa force électromotrice fût moindre que la différence de

potentiel régnant à ses raccords avec les barres générales + et — du tableau, elle se trouverait traversée par un courant de sens inverse à celui qu'elle débitait, lequel renverserait sa polarité et lui ferait développer une force électromotrice opposée à celle qu'elle engendrait antérieure-

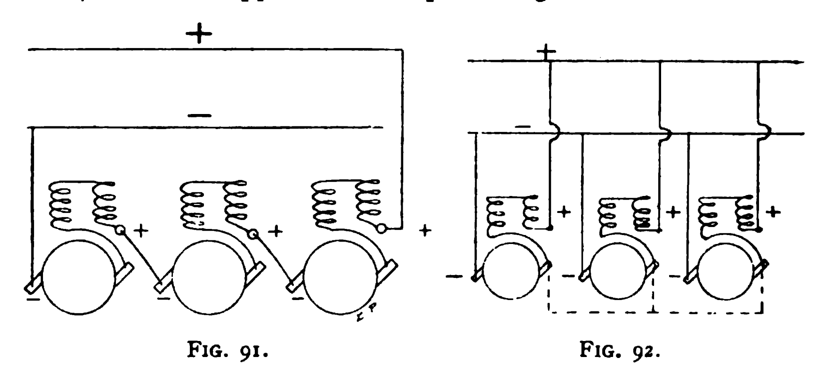


FIG. 91. FIG. 92.

ment, puisque, entraînée par son moteur, elle continue à tourner dans le même sens. Un courant extrêmement intense la traverserait; ferait fonctionner les appareils de sûreté, ce qui l'isolerait du circuit et rendrait difficile son amorçage ultérieur, vu le sens du nouveau magnétisme rémanent.

On évite cet inconvénient en réunissant en dérivation les bobines inductrices de toutes les machines par un fil dit *de compensation*, représenté en trait interrompu sur la figure 92.

Dès lors, un courant de même sens est toujours soutenu dans les inducteurs et, si un induit vient à ralentir au point de devenir le siège d'un courant inverse, il fonctionne aussitôt comme moteur, entraîne sa transmission et tend à rétablir la vitesse de régime.

Dynamos en dérivation. — Le simple groupement en série des dynamos shunt, rend possibles des renversements de pôles, car si les inducteurs de l'une d'elles sont traversés par le courant provenant de l'induit d'une autre, elles produisent des forces électromotrices opposées. On empêche

cet effet de se manifester en réunissant séparément en série (fig. 93) induits et inducteurs, mis les uns et les autres en dérivation entre les bornes extrêmes. Si alors une des machines ralentit, ses inducteurs restent néanmoins traversés par un courant de même sens que précédemment et le sens de la polarité reste invariable.

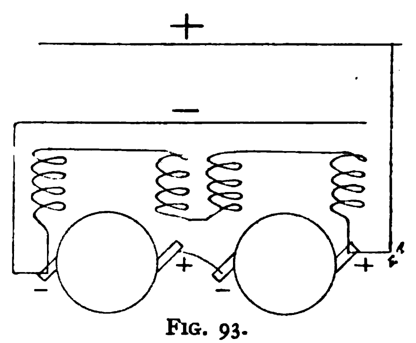


Fig. 93.

Dans le groupement en dérivation (fig. 94), l'inversion de polarité ne peut se produire puisque, comme nous l'avons déjà fait remarquer, le courant dans les inducteurs reste de même sens, que la force électromotrice prépondérante réside dans l'induit ou la canalisation extérieure.

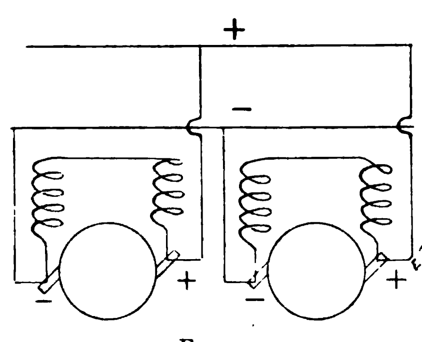


Fig 94.

Il faut toutefois éviter que l'armature d'une des machines ne vienne à être traversée par le courant du tableau, car alors son couple résistant se transforme en couple moteur, et elle soutirerait de l'énergie à l'installation au lieu de lui en céder.

On évite cet inconvénient en ne couplant une machine qu'au moment où elle donne sensiblement la même force électromotrice que les autres. On réglera ensuite son champ magnétique, pour lui faire débiter un courant en rapport avec sa puissance.

Pour découpler une dynamo, on diminuera d'abord son excitation en agissant sur son rhéostat de champ, de manière à annuler ou du moins réduire à une valeur minime le cou-

rant qu'elle débite, ce qui permet de la découpler sans inconvénient.

Dynamos compounds. — La figure 95 donne le montage à réaliser pour coupler en dérivation des compounds à court shunt.

Afin d'éviter le renversement du champ inducteur dû aux spires placées en série, on réunit en dérivation les enroulements série des machines par le fil compensateur figuré en traits interrompus et dans lequel on intercale un galvanoscope. Quand celui-ci est au zéro, ce qu'on obtient par le réglage des champs dérivés, les deux machines fonctionnent d'une manière absolument indépendante.

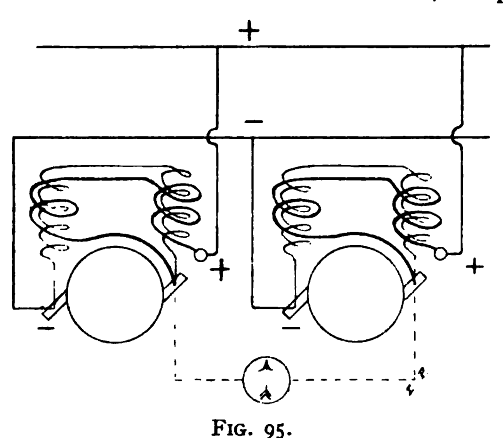


FIG. 95.

§ 2. — ESSAIS.

Il existe un assez grand nombre de méthodes d'essai des dynamos, mettant pour la plupart à contribution à la fois des mesures mécaniques et électriques. Les premières sont moins précises que les secondes, auxquelles il sera donc en général préférable de recourir quand on le peut.

Méthode de Swinburne. — Une des méthodes le plus pratiques et d'ailleurs le plus usitées dans l'industrie, est celle de Swinburne. Son application n'exige que l'emploi de trois appareils usuels : un compte-tours, un ampèremètre et un voltmètre.

D'une manière générale, nous pouvons écrire que le rendement industriel d'une machine est le rapport de la puissance utile restituée à la puissance dépensée.

MACHINE SÉRIE. GÉNÉRATRICE. — Considérons successivement un générateur et un moteur série. Appelons comme précédemment r et s les résistances de l'induit et des inducteurs, I le courant débité par l'induit qui est aussi celui traversant les inducteurs et le circuit d'utilisation, e la force électromotrice aux bornes et E la force électromotrice totale.

La puissance utile du générateur est eI. La puissance totale dépensée pour l'obtenir comprendra d'abord cette puissance utile, puis les diverses pertes de la machine Parmi celles-ci, les pertes par effet Joule $I^2(r+s)$ peuvent être déterminées aisément. Il suffira, après calage de l'induit, de connecter la dynamo avec une source constante de courants, comme quelques éléments d'accumulateurs, de mesurer le voltage aux bornes E_1 et l'intensité i_1 du courant qui passe. L'application de la loi d'Ohm donne pour la résistance cherchée

$$r+s=\frac{E_1}{i_1}.$$

Il faut toutefois remarquer que, la résistance des métaux croissant avec la température, cette mesure doit se faire immédiatement après fonctionnement pendant quatre heures au moins, pour que la température de régime ait été atteinte.

Il reste à déterminer les autres pertes de la machine dues à l'hystérésis, aux courants de Foucault et aux frottements mécaniques. Désignons-les par F.

Or, nous savons que lorsqu'un induit tourne comme moteur, le produit du courant qui le traverse par la force contre-électromotrice qu'il développe, est égal au travail mécanique utile plus les pertes dont nous nous occupons. Ceci fait entrevoir le moyen de les déterminer.

Il suffira de faire fonctionner l'induit comme moteur *à vide,* ce qui annule le travail utile, et de s'arranger pour que les frottements mécaniques, l'hystérésis et les courants de

Foucault soient les mêmes ou sensiblement les mêmes qu'en charge. Toutes ces pertes étant proportionnelles à la vitesse, nous trouvons immédiatement comme première condition à réaliser : *le nombre de tours de l'induit dans l'expérience à vide, doit être le même qu'en charge.* En outre, deuxième condition, *le flux traversant l'induit doit aussi avoir la même valeur,* puisque les courants de Foucault et l'hystérésis en dépendent.

La vitesse se déterminera au moyen du compte-tours. Quant au flux, puisque l'on a

$$E = nN\mathcal{N}\,10^{-8},$$

on sera certain qu'il aura la même valeur que lors de la marche à pleine charge, quand l'induit tournant à N tours comme avant, développera une force contre-électromotrice précisément égale à la force électromotrice de la dynamo.

Celle-ci était

$$E = e + (r + s)i.$$

Nous la connaissons. Excitons donc les inducteurs par une source indépendante variable à volonté, puis mesurons le courant i' qui passe et la force électromotrice aux bornes dont l'expression est

$$E' = e' + ri'.$$

En général, ce dernier terme est négligeable.

Pour satisfaire aux conditions imposées, nous disposerons donc de la force électromotrice appliquée E′ et du courant inducteur indépendant produisant le flux, de manière à avoir

$$E' - ri' = e' = E$$

quand l'induit fait N tours.

A ce moment,

$$F = e'i' = Ei',$$

de sorte que le rendement s'exprimera par

$$\eta_{gs} = \frac{eI}{eI + (r + s)I^2 + Ei'}.$$

Moteur série. — Dans le cas du moteur, le rendement est le rapport de la puissance mécanique disponible sur l'axe, à la puissance électrique EI dépensée à ses bornes. La puissance mécanique disponible est évidemment égale à cette dernière diminuée de toutes les pertes de la machine, soit

$$EI - (r + s)I^2 - F.$$

On déterminera F par une expérience à vide comme précédemment, en faisant tourner le moteur à la même vitesse N et de manière à lui faire développer la même force électromotrice

$$E' = E - (r + s)I$$

qu'en charge.

On réglera donc le champ inducteur et la force électromotrice appliquée E″ de manière que

$$E'' - ri'' = E'$$

à la vitesse N.

Alors

$$F = E'i'',$$

et le rendement du moteur devient

$$\eta_{ms} = \frac{EI - (r + s)I^2 - E'i''}{EI}.$$

Machine en dérivation. — D'après ce qui précède, on trouvera aisément pour la génératrice

$$\eta_{gd} = \frac{ei}{ei + rI^2 + di_d^2 + Ei'}.$$

Avec

$$E = e + rI,$$

et pour le moteur

$$\eta_{md} = \frac{EI - ri^2 - di_d^2 - E'i''}{EI},$$

avec

$$E' = E - ri.$$

Enfin, les expressions dans le cas des machines compounds, se déduiraient de la même manière que les relations précédentes.

Exactitude de la méthode. — Les résultats fournis par l'application de cette méthode, sont un peu trop forts. Sous charge, en effet, la concentration du flux sous les cornes polaires de sortie, par suite de la réaction d'induit y augmente l'induction et par suite les pertes hystérétiques qui sont fonction de l'induction maximum. Les courants de Foucault sont renforcés aussi, tant dans le noyau que dans les pièces de consolidation de l'induit, de sorte que la puissance déterminée à vide sera un peu trop faible, et le rendement déduit comme ci-dessus a une valeur un peu trop forte.

Quoi qu'il en soit, les résultats que l'on peut obtenir sont exacts à 1 ou 2 % près, approximation très satisfaisante pour les besoins de la pratique.

CHAPITRE IX

LES ACCUMULATEURS

§ 1. — GÉNÉRALITÉS.

Nous avons vu que les produits d'une électrolyse peuvent, en se recombinant, donner lieu à un courant de sens inverse entretenu par la force électromotrice de polarisation. Après avoir électrolysé un électrolyte, on peut donc récupérer une certaine partie de l'énergie électrique dépensée, en laissant par la suppression de la source d'électricité et la fermeture du circuit se recombiner spontanément les éléments dissociés. On a constitué ainsi un *accumulateur* ou *pile secondaire,* dont l'énergie restituée pourra être d'autant plus grande, que les quantités d'ions mis en liberté sur les deux électrodes seront plus considérables et leur affinité chimique plus vive. C'est, en somme, un emmagasinage de l'énergie électrique sous forme d'énergie chimique potentielle.

Rendements. — Appelons T_c le temps pendant lequel on a procédé à l'électrolyse, c'est-à-dire à la *charge,* I_c le courant à un moment quelconque t. La quantité d'électricité ayant traversé l'électrolyte sera

$$Q_c = \int_0^{T_c} I_c dt.$$

De même, à la décharge, on aura

$$Q_d = \int_0^{T_d} I_d dt,$$

de sorte que le rendement en quantité sera

$$\eta_q = \frac{Q_d}{Q_c} = \frac{\int_0^{T_d} I_d dt}{\int_0^{T_c} I_c dt}.$$

Q_d représente la capacité du système.

En désignant par E_c et E_d les différences de potentiel à un moment quelconque de la charge et de la décharge, W_c et W_d, P_c et P_d les énergies et puissances correspondantes, on a pour le rendement en énergie

$$\eta_w = \frac{W_d}{W_c} = \frac{\int_0^{T_d} E_d I_d dt}{\int_0^{T_c} E_c I_c dt} = \frac{\int_0^{T_d} P_d dt}{\int_0^{T_c} P_c dt}.$$

Pratiquement, pour déterminer ces rendements, on relève tant à la charge qu'à la décharge, à des intervalles de temps égaux et suffisamment rapprochés, par exemple toutes les 10 minutes, l'intensité en ampères du courant qui passe et la différence de potentiel aux bornes, en volts. On dresse alors des tableaux donnant ces intensités et différences de potentiel successives et permettant d'évaluer aisément les intensités et puissances moyennes, lesquelles, multipliées par la durée des opérations, donnent les quantités de courant en ampères-heures et les énergies en watts-heures.

On peut aussi, à l'aide de ces tableaux, dresser les courbes des intensités et des puissances en fonction du temps. L'aire de ces courbes, comprise entre deux ordonnées extrêmes et l'axe des temps, représentera précisément les intégrales précédentes, ce qui conduira encore à la détermination des rendements.

Facteurs spécifiques. — On caractérise les accumulateurs en rapportant au poids de leurs électrodes, ou mieux à leur

poids total, leur capacité, l'intensité et le débit, la puissance et l'énergie qu'ils sont capables d'absorber ou de restituer dans des conditions normales. On obtient ainsi les capacités en ampères-heures, les courants de charge et décharge en ampères, la puissance en watts, l'énergie en watts-heures par kilogramme de plaques ou totaux.

Substances essayées. — Nous laisserons de côté les accumulateurs au gaz, dont la pile à gaz de Grove est un exemple. Ils n'ont pas encore fourni des résultats industriels, bien que des chiffres spécifiques remarquables aient déjà été atteints.

Un assez grand nombre de combinaisons voltaïques ont été étudiées. Parmi les principales, nous trouvons les couples :

Plomb — eau acidulée sulfurique — plomb;
Id. — sulfate de cuivre — plomb ou cuivre;
Id. — sulfate de zinc — plomb ou zinc;
Cuivre — zincate de soude ou potasse — fer;
Plomb — eau acidulée sulfurique — cadmium.

La plupart ont dû être abandonnés, soit à cause de capacités trop faibles, soit parce qu'ils ne gardaient pas la charge communiquée, et il n'est resté, tout au moins d'un emploi général, que l'accumulateur plomb-eau acidulée sulfurique-plomb, découvert en 1860 par Planté, lequel fournit à la décharge la force électromotrice élevée très constante, d'environ deux volts.

§ 2. — THÉORIE, COMPOSITION ET FONCTIONNEMENT DES ACCUMULATEURS AU PLOMB.

Formation. — Considérons une cuve électrolytique contenant de l'eau, dans laquelle plongent deux électrodes en plomb, et faisons-la traverser par un courant.

PREMIÈRE CHARGE. — L'eau va être électrolysée. L'oxygène viendra oxyder l'anode et la transformera superficiellement en peroxyde de plomb PbO^2; l'hydrogène à l'état naissant se dégagera sur la cathode

$$\underset{+}{Pb} + 2H^2O + \underset{-}{Pb} = \underset{+}{PbO^2} + 2\overset{\uparrow}{H^2} + \underset{-}{Pb}.$$

Première décharge. — Supprimons la source d'électricité et réunissons les électrodes par un fil conducteur. Une électrolyse inverse va se produire. L'eau du bain fournira des ions H venant réduire le peroxyde de l'anode en protoxyde, tandis que les ions O correspondants viendront protoxyder la cathode. Quant cette réaction sera terminée, l'équilibre chimique est obtenu, le courant cesse.

Deuxième charge. — Rompons le circuit et faisons de nouveau passer un courant dans le même sens que précédemment. Le protoxyde de l'anode se peroxydera, tandis que celui de la cathode va se réduire à l'état de plomb pulvérulent doué d'affinités particulières

$$\underset{+}{PbO} + H^2O + \underset{-}{PbO} = \underset{+}{PbO^2} + H^2O + \underset{-}{Pb}$$

puis l'H se dégagera à la cathode, tandis que l'action oxydante pénétrera plus avant dans la masse métallique de l'anode.

Deuxième décharge. — Mêmes réactions que pour la première. Mais les masses de matières aptes à réagir étant plus considérables, la quantité d'électricité restituée sera plus grande (réciproque de la première loi de Faraday), et ainsi de suite.

La succession d'opérations électrolytiques, charges et décharges ayant pour but d'augmenter la masse de *matières actives* des électrodes, porte le nom de *formation* de l'accumulateur.

Théorie de l'accumulateur. — L'électrolyte simple que nous venons de considérer présenterait le double inconvénient d'être insuffisamment conducteur et de se consommer promptement par suite du dégagement de l'H. En pratique on mélange à l'eau de l'acide sulfurique, qui améliore la conductibilité et intervient dans les réactions. On a longtemps expliqué celles-ci par l'équation

$$\underset{+}{PbO^2} + 2H^2SO^4 + \underset{-}{Pb} = \underset{+}{PbSO^4} + 2H^2O + \underset{-}{PbSO^4},$$

d'après laquelle deux équivalents d'acide sulfurique seraient

engagés et viendraient sulfater les électrodes, d'où le nom de théorie de la double sulfatation.

Mais, comme l'a fait remarquer M. Darrieus, qui s'est livré à une série très complète d'analyses des matières actives des électrodes, cette théorie serait erronée.

A la fin de la charge, la matière active positive est formée de peroxyde de plomb imprégné d'un liquide suroxygéné contenant de l'acide persulfurique $H^2S^2O^8$; l'électrode négative est revêtue d'une couche de plomb doux très poreux, différant du plomb doux ordinaire finement divisé, par une grande aptitude à s'oxyder et des propriétés réductrices intenses. Il dégage d'ailleurs de la chaleur en passant à l'état ordinaire.

Pendant la décharge, le peroxyde de l'électrode positive se transforme partiellement en oxyde inférieur, dont la quantité est toujours fonction de la décharge. La quantité de sulfate qui s'y forme est variable et augmente avec le temps pendant lequel l'accumulateur reste au repos; elle doit être attribuée à des actions locales.

Quant à l'électrode négative, elle s'est oxydée, puis sulfatée, la quantité d'acide disparu correspond très approximativement à celle fixée sur le plomb des négatives, pour former le sulfate.

En somme, le fonctionnement de l'accumulateur au plomb est celui d'une pile au plomb, à dépolarisant solide de peroxyde de plomb. L'acide persulfurique donne le coup de fouet du début; la force électromotrice élevée obtenue tient à la nature particulière du métal négatif, car il suffit, dans une combinaison hydro-électrique ordinaire PbO^2 et Pb doux, de remplacer ce dernier par une plaque recouverte de plomb poreux naissant obtenu *sans aucune charge,* par exemple en réduisant chimiquement un sel de plomb par le zinc, pour voir immédiatement monter la force électromotrice.

Moyens d'accélérer la formation. — La préparation par charges et décharges successives, de quantités suffisantes de matières actives sur les électrodes, correspond à une grande dilapidation d'énergie, même si l'on utilise la décharge d'une

batterie à la charge d'autres. En outre, le temps nécessaire est considérable, parce qu'on ne peut dépasser une certaine densité de courant par unité de surface métallique plongée dans l'électrolyte, tant à la charge qu'à la décharge.

MOYENS CHIMIQUES. — Planté a conseillé de chauffer les bains de formation, ou mieux, de plonger les électrodes pendant quelques jours dans l'acide nitrique étendu de son volume d'eau. Une petite quantité de plomb se dissout et le métal devient spongieux à la surface, ce qui favorise les réactions ultérieures. Mais ces procédés sont dispendieux ou compliqués; leur application rend parfois les lames cassantes.

MOYENS PHYSIQUES : TARTINAGE. — Il est plus simple, comme l'indiqua en premier lieu Faure, de déposer directement sur les plaques des mélanges aptes à prendre aisément la composition voulue. On emploie souvent pour les plaques positives, une pâte de minium Pb^3O^4 malaxé dans l'acide sulfurique dilué à la densité 1,1, ce qui correspond à une teneur d'environ 14 °/ₒ en poids d'acide sulfurique normal et pour les négatives, de la litharge Pb O malaxée avec une solution de densité 1,2, soit 27 °/ₒ en poids. Parfois, on se borne à appliquer un mélange des deux oxydes, indifféremment sur les deux électrodes.

Électrodes à formation autogène ou hétérogène. — On est donc amené à deux modes bien tranchés de préparation des électrodes :

1° On produit la matière active aux dépens du support qui s'attaque peu à peu et finit pour les plaques positives par devenir nul et s'affaisser lorsque l'attaque est complète. C'est *la formation Planté ou autogène.*

La couche active est fort mince; elle n'excède pas un à deux dixièmes de millimètre. Aussi, pour augmenter la capacité, convient-il de réaliser avec un poids donné de plomb une surface maximum. La capacité des plaques Planté est en général faible; leur formation est lente, mais elles sont robustes et la couche d'oxyde y adhère énergiquement.

2° On applique la matière active préparée de toutes pièces sur une grille plus ou moins heureusement combinée, de

manière à retenir le mieux possible les oxydes. On augmente ainsi la capacité, l'accumulateur s'allège, mais sa destruction est plus rapide. On retarde celle-ci en diminuant l'oxydabilité du grillage. M. Julien emploie dans ce but un alliage de plomb, 95 ; antimoine, 3,5 ; mercure, 1,5.

Comme par suite du foisonnement plus grand, dû à une plus haute oxydation, l'électrode positive tend à se gondoler davantage et se détériore plus que la négative, la plupart des constructeurs ont actuellement adopté des électrodes à formation autogène pour les positives, à formation hétérogène pour les négatives.

Forme générale et disposition des électrodes. — Forme spirale. — Dès le début Planté employa, pour augmenter les surfaces actives en présence, deux électrodes constituées par deux lames de plomb enroulées en spirale et isolées l'une de l'autre. Cette disposition a été abandonnée, notamment parce qu'elle ne permet pas un démontage ni un entretien faciles.

Forme plane. — La forme plane rectangulaire (fig. 96) se rencontre le plus fréquemment. Les plaques se terminent d'un côté, à leur partie supérieure, par une queue de connexion Q au moyen de laquelle on raccorde ensemble, soit par soudure autogène, soit par tiges, rondelles et boulons de serrage, toutes les plaques de même polarité. On admet plus ou moins de plaques suivant la capacité que l'on veut obtenir, leurs dimensions variant également. On fait naturellement alterner les plaques de polarités différentes placées parallèlement, à distance suffisante pour éviter les

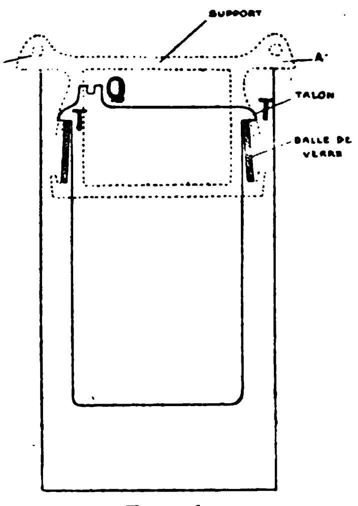


Fig. 96.

courts-circuits. Les plaques extrêmes sont habituellement négatives afin de rendre plus symétrique l'usure des plaques positives qui fatiguent davantage. Ces plaques extrêmes ne sont d'ailleurs généralement tartinées que sur leur face intérieure.

Forme massive. — Dans certains types récents, utilisés principalement pour la traction, les deux électrodes s'emboîtent l'une dans l'autre. L'une est un parallélipipède présentant des vides, dans l'axe desquels viennent se placer les masses cylindriques ou carrées de l'autre électrode. Par cette disposition, l'électrolyte, entièrement cloisonné sous de petits volumes, n'acquiert pas de mouvements de masse destructifs pour la matière active, malgré les trépidations du transport.

Séparation et fixation des électrodes. — L'exacte séparation des électrodes entre elles est assurée par des tubes en verre, jarretières de caoutchouc, peignes ou cloisons perforées d'ébonite, etc.

Les plaques sont soutenues à une certaine distance du fond, pour que le dépôt qui se forme à la longue ne les mette pas en court-circuit. Elles portent à cette fin des talons TT qui viennent reposer : soit sur des dalles en verre soutenues elles-mêmes par un support approprié (fig. 96); soit sur des dalles prenant appui au fond du vase (fig. 97) par l'intermédiaire de tasseaux en plomb; soit, dans les petits modèles à vases en verre, directement sur les bords du récipient lui-même.

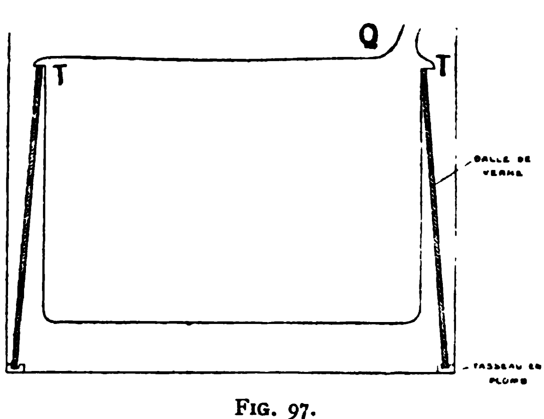


Fig. 97.

On coule aussi le fond des vases avec des replis venant supporter les plaques à la hauteur voulue. Un meilleur dispositif, dans cet ordre d'idées, est réalisé en rétrécissant le fond du vase (fig. 98), les extrémités des plaques venant s'asseoir sur les redents A et B. Pour assurer une séparation stable des électrodes, les parois verticales portent en outre des saillies en verre, venues de fonte.

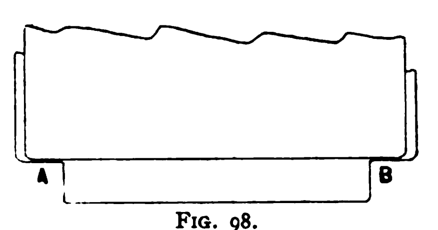


FIG. 98.

La figure 99 donne la vue d'un élément complètement monté.

Électrolyte. — LIQUIDE LIBRE. — Le liquide employé est une solution d'acide sulfurique pur dans l'eau distillée. La densité varie de 1,12 environ, ce qui correspond à 16° Baumé et un poids d'acide sulfurique normal de 17 °/₀ à 1,22, soit 26 Baumé et 29,6 °/₀ d'acide. Pour le préparer, il faut avoir soin de verser lentement l'acide dans l'eau en agitant, et non l'eau dans l'acide, à cause de la grande élévation de température qui se produit et pourrait provoquer des projections du liquide corrosif.

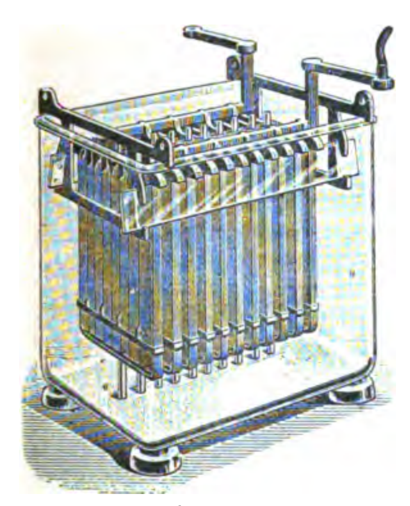


FIG. 99.

La raison de l'adoption des proportions indiquées ci-dessus, est que la capacité de l'accumulateur croît avec la concentration de la solution sulfurique et passe par un maximum aux environs de la densité 1,22. Le phénomène serait dû,

d'après M. Dolezalek (°), à ce que la solution sulfurique atteint en ce point son maximum de conductibilité.

Liquide immobilisé. — On a essayé, dans les accumulateurs transportables, d'assurer la stabilité mécanique du liquide, en l'immobilisant soit dans des substances gélatineuses, soit des substances inertes, granulées ou fibreuses. Les résultats obtenus, tout au moins dans les grands modèles, n'ont jamais été satisfaisants, parce qu'on augmente la résistance et rend la surveillance des plaques impossible, ce qui favorise la production de courts-circuits. En outre, la capacité se trouve fortement diminuée, par le fait que la migration des ions actifs se fait d'autant moins aisément que l'immobilisation est plus complète.

Récipients. — Installations fixes. — Les vases en verre moulé sont les plus avantageux. Leur transparence facilite la surveillance; par contre ils sont fragiles.

On emploie parfois le grès, mais il n'est pas isolant et donne lieu à des suintements.

Pour les grands éléments, on recourt au plomb antimonieux ou au bois doublé de plomb. Les soudures doivent être autogènes.

Installations mobiles. — On emploie : le celluloïd, léger, solide et transparent, mais inflammable; l'ébonite, très bon mais coûteux ; les succédanés de ce dernier, ambroïne, etc., le bois doublé intérieurement d'ébonite.

Montage d'une batterie. — Les divers éléments sont réunis en tension. A cet effet, la barre de liaison des queues des plaques négatives d'un élément se boulonne ou se soude à celles des plaques positives de l'élément suivant et ainsi de suite (fig. 100).

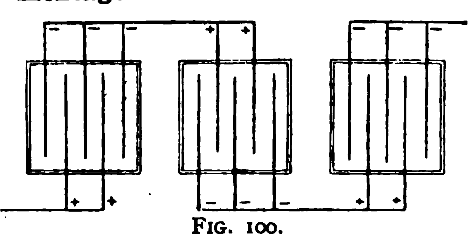


Fig. 100.

(°) *La théorie de l'accumulateur au plomb.*

On rencontre aussi parfois des plaques jumellées (fig. 101). La plaque négative est soudée à la plaque positive qui lui est conjuguée dans l'élément suivant, disposition qui facilite l'entretien, puisqu'on peut retirer une paire de plaques sans interrompre le fonctionnement de la batterie. Mais l'examen du liquide compris entre les électrodes est moins facile que lorsque celles-ci sont perpendiculaires à l'axe de la batterie (fig. 100).

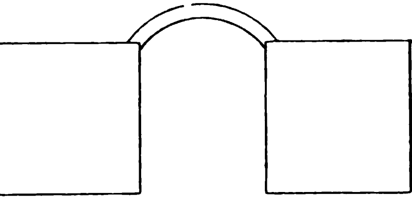


FIG. 101.

On met obstacle aux fines projections de liquide qui se produisent vers la fin de la charge par suite du dégagement de l'hydrogène, en recouvrant la solution d'une lame en verre ou d'une couche de paraffine fondue qui se prend en pellicule facile à enlever.

Les éléments, rapprochés sans se toucher, se posent sur des madriers ou des étagères par l'intermédiaire de roulettes isolantes en porcelaine ou verre. Pour parer à l'abaissement de l'isolement qui résulte des condensations aqueuses se produisant sur la surface de ces supports, on les divise souvent en deux parties (fig. 102). L'inférieure est pourvue d'un godet circulaire rempli d'huile dans laquelle vient plonger une expansion circulaire de la partie supérieure. Les deux pièces sont séparées par une cale en plomb.

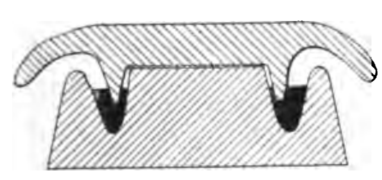


FIG. 102.

Les madriers sont eux-mêmes soutenus par des isoloirs du même genre (fig. 103).

Résistance intérieure. — La résistance d'un accumulateur dépend naturellement de ses dimensions. Elle réside principalement dans les couches d'oxydes et varie avec la composition de l'électrolyte, c'est-à-dire avec l'état de la charge ou

de la décharge. En tout cas elle est très faible, ne dépasse pas quelques millièmes d'ohms dans les éléments de moyenne

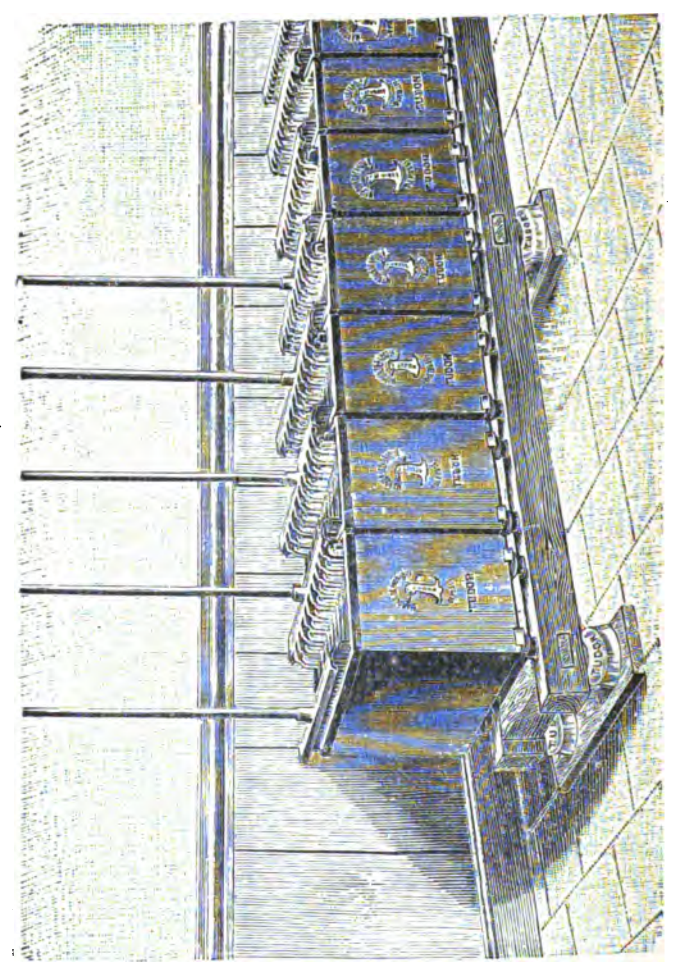


FIG. 103.

grandeur; aussi les court-circuits sont à craindre, à raison des énormes courants qui peuvent en résulter.

Divers modes de charge. — On charge les accumulateurs soit à intensité, soit sous potentiel constants. MM. Cahen et

Donaldson (*) ont expérimenté ces deux modes sur un élément à électrode positive Planté. La charge sous potentiel constant se faisait en le soumettant à une différence de potentiel constante de 2,5 volts. Voici les résultats de leurs essais :

PROCÉDÉ de CHARGE	Durées de charge en minutes	Décharge		Rendement en °/₀	
		A-H	W-H	En quantité	En énergie
Courant constant.	206	65,25	123	95,5	81
Potentiel »	82	86	163	93,5	70,5

La durée de la charge à courant constant est donc deux fois et demie plus longue que celle à potentiel constant, et le rendement en énergie est de 10 °/₀ plus élevé. Par contre, la charge sous potentiel constant augmente l'énergie restituée de 32,5 °/₀. Elle est donc particulièrement indiquée là où les réductions de poids ou de temps jouent un rôle primordial, par exemple, en traction. D'une manière générale, c'est la charge à courant constant qui est appliquée, parce qu'elle ménage mieux les éléments; nous étudierons ses principales caractéristiques.

Régimes de charge et de décharge. — Les constructeurs indiquent toujours les régimes auxquels il convient de faire travailler leurs appareils; il est prudent de les suivre exactement. A la charge, la densité du courant se tient généralement entre 0,5 et 1,5 A par kilogramme d'électrode et 0,4 à 2 A à la décharge.

Variation de la capacité avec le régime, ses causes. — La capacité d'une batterie varie essentiellement avec le

(*) *De la charge des accumulateurs et de leur rendement.* (ÉLECTRICIEN, t. XVII, p. 165.)

régime qui lui est appliqué. M. Peukert (°) a trouvé que le courant I de décharge est lié à la durée T par la formule

$$I^n T = \text{constante}.$$

Cette équation s'applique à une batterie quelconque, la valeur de *n* variant naturellement d'un type à l'autre.

On peut facilement en déduire la capacité pour un régime donné, connaissant celle d'un autre régime. Si l'on appelle Q et Q_1 les deux capacités, I et I_1 les intensités de décharge de durées T et T_1, on aura

$$Q = IT, \quad Q_1 = I_1 T_1, \quad \text{d'où} \quad Q = Q_1 \frac{IT}{I_1 T_1}. \qquad (1)$$

Mais

$$I^n T = I_1^n T_1, \quad \text{d'où} \quad \frac{T}{T_1} = \frac{I_1^n}{I^n};$$

en remplaçant dans (1), il vient

$$Q = Q_1 \left(\frac{I_1}{I}\right)^{n-1}.$$

Plus I sera grand, plus la quantité d'électricité que peut restituer la batterie sera faible. A quelles causes faut-il attribuer ce phénomène ?

D'après M. J. Wade (°°), la décroissance de l'énergie spécifique avec l'augmentation de l'intensité de la décharge serait due à la porosité insuffisante de la matière active et à la diffusion trop lente de l'électrolyte. On comprend, en effet, que l'énergie maximum d'une matière active ne puisse être obtenue qu'à condition que l'électrolyte ait accès à chacune de ses molécules, c'est-à-dire que sa porosité soit moléculaire. Or, comme la diffusion dans la masse de la matière active est plus lente qu'au sein de l'électrolyte lui-même, ce sont les portions externes de cette matière active qui auront à fournir le supplément d'énergie demandé dans les décharges

(°) *Electrotechnische Zeitschrift*, 1897.

(°°) BAINVILLE, *Étude sur les accumulateurs*. (ÉLECTRICIEN, t. XIX de 1900, p. 361.)

rapides. Cette répartition inégale du travail va en s'accentuant vers la fin de la décharge, attendu que la sulfatation de la matière active a pour résultat d'augmenter son volume, c'est-à-dire de réduire l'espace déjà insuffisant pour l'accès du liquide, que laissaient entre elles les molécules.

La décharge se trouve donc limitée, d'un côté par l'état avancé de réduction ou d'oxydation des portions externes de la matière active; d'un autre côté par la trop faible densité de l'acide qui entoure les couches internes. Il apparait dès lors clairement, pourquoi la capacité tombe si rapidement à mesure qu'on augmente le régime de décharge, et aussi pourquoi l'on n'obtient pas un accroissement de cette capacité en augmentant l'épaisseur des couches de matière active au delà d'une certaine limite.

En somme, une diffusion imparfaite fait travailler les couches profondes dans de mauvaises conditions, tant à la charge qu'à la décharge, et doit au surplus abréger la vie de l'élément, en détruisant la structure moléculaire de la matière active et en favorisant les actions locales sur son support.

Caractéristiques des charges et décharges normales. — VARIATION DU VOLTAGE. — Au début de la charge, la force électromotrice monte en quelques minutes à 2,1 volts (fig. 104), puis son accroissement est fort lent jusque 2,2 volts, pour monter ensuite rapidement vers la fin de la charge jusque 2,5, 2,6 et même 2,7 volts, suivant l'intensité du courant. Lorsqu'on arrive à ces voltages, le liquide se met à bouillonner vivement, indice qu'une partie de l'énergie électrique est dépensée en pure perte à dis-

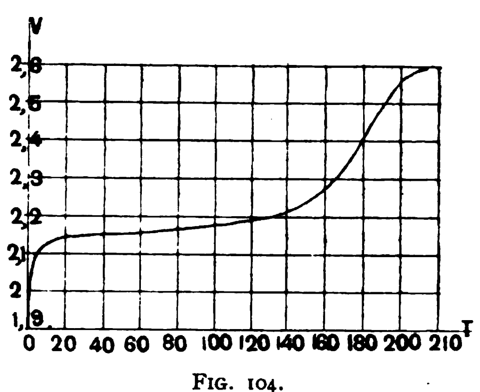


FIG. 104.

socier le liquide; il est temps d'arrêter, à moins que l'on ne veuille, par une surcharge énergique, désulfater complètement les plaques. Lorsque l'élément chargé est laissé au repos, sa force électromotrice décroît jusqu'aux environs de 2 volts.

A la décharge, le voltage tombe en quelques minutes au-dessous de 1,95 volt (fig. 105), puis la décroissance est d'autant plus lente que le régime est plus modéré. Vers la fin de la décharge, la chute s'accélère. On arrête quand la force électromotrice aux bornes atteint 1,85 à 1,80 volt, suivant l'intensité du débit, le premier nombre se rapportant au régime modéré. Il convient de ne pas descendre au-dessous de ces valeurs limites.

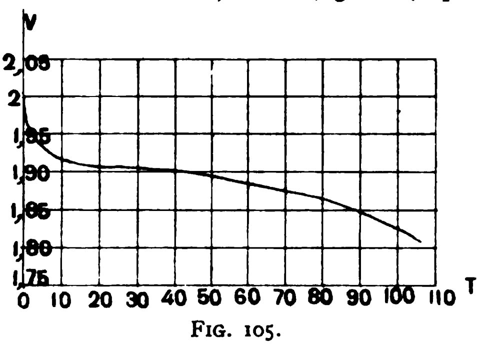


Fig. 105.

Variation de la densité. — La densité varie régulièrement d'environ 3° Baumé pendant la charge et la décharge. Elle atteint à froid, à la fin de la charge, de 1,16 (20° Baumé) à 1,26 (30° B). Les faibles densités ménagent les électrodes, mais il faut alors disposer d'un grand volume de liquide pour utiliser toute leur capacité. Les grandes densités élèvent la force électromotrice, mais elles abrègent la durée. On apprécie la densité au moyen de densimètres très aplatis qui se glissent aisément entre les plaques.

Rendements. — De bons accumulateurs, bien traités, ont un rendement de 90 à 92 °/ₒ en quantité et 85 °/ₒ en énergie.

Durée. — Les négatifs des éléments stationnaires peuvent durer dix ans. Les positifs s'usent davantage. Quand ils sont à formation hétérogène, ce qui est actuellement l'exception, ils ne durent guère au delà de trois ans.

Conservation d'une batterie. — Les plaques d'une batterie abandonnée à elle-même, se recouvrent d'une couche blanche

compacte de sulfate difficile à réduire ultérieurement. Cette sulfatation est d'autant plus énergique que la décharge de la batterie a été poussée plus loin. Il faut donc avoir soin de charger les accumulateurs, qui doivent être laissés au repos pendant quelques semaines, et les recharger de mois en mois si la période d'inactivité doit se prolonger.

Si cette dernière est très longue, on s'affranchira des charges périodiques en lavant soigneusement les plaques après la dernière charge et les remontant dans une dissolution de sulfate de soude neutre qui les conserve indéfiniment. La première charge s'effectuera avec ce liquide.

Locaux. — Les locaux dans lesquels on installe des accumulateurs doivent être secs, bien aérés et éclairés. On évitera toutefois l'accès direct du soleil qui pourrait provoquer le bris des vases en verre. La température doit rester aussi uniforme que possible. On n'y circulera pas avec des lumières à flamme libre, vu la présence possible d'hydrogène formant des mélanges détonants. Enfin, les parquets seront asphaltés ou couverts de plomb et en pente; toutes les pièces métalliques sujettes à oxydation devront être recouvertes d'une peinture protectrice qui peut être formée par parties égales de goudron et de térébenthine appliqués à chaud.

§ 3. — DESCRIPTION DE QUELQUES TYPES D'ACCUMULATEURS PLOMB-PLOMB. SCHÉMA D'INSTALLATION. EMPLOIS.

Les constructeurs établissent en général divers types de leurs accumulateurs, suivant les usages auxquels ils sont destinés. Pour une batterie fixe où le poids n'a aucune importance, les électrodes sont épaisses, la formation autogène prédomine. On y distingue souvent deux régimes : celui à décharge lente (dix à trois heures), celui à décharge rapide (trois à une heure).

Quand les éléments doivent être transportés, le poids est aussi réduit que possible, la forme devient plus compacte;

on ne dépasse guère 20 kilogrammes comme poids total de l'élément.

Accumulateur Tudor. — La plaque positive (fig. 106), à formation Planté, présente de fines lamelles verticales presque jointives encadrées de nervures horizontales. La plaque négative (fig. 107) est du type Faure. L'oxyde est

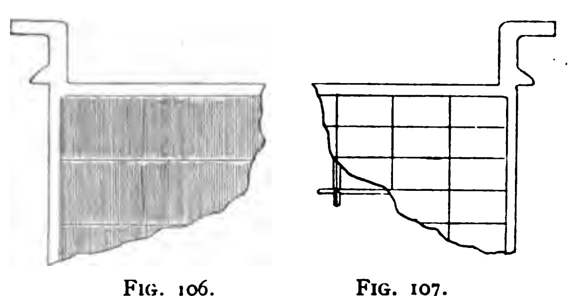


Fig. 106. Fig. 107.

contenu dans un grillage dont les barres horizontales ont la forme d'augets.

Les éléments stationnaires se divisent en deux catégories : A) ceux à décharge lente (de dix à trois heures); B) ceux à décharge rapide (de trois à une heure). Voici quelques données sur des types de diverses grandeurs (*) :

Capacité en ampères-heures aux régimes de décharge en						Régimes de charge en ampères				POIDS total en kilogr.
A			B			A		B		
10 heures	5 heures	3 heures	3 heures	2 heures	1 heure	normal	maxim.	normal	maxim.	
32,5	27,5	24	22,5	20	16	5	7,5	7,5	10	14
390	330	288	270	240	192	60	90	90	120	102
1 300	1 100	960	900	800	640	200	300	300	400	330

(°) Les renseignements numériques donnés dans le présent paragraphe, sont en grande partie extraits des catalogues des constructeurs.

Accumulateur d'Arsonval-Vaugeois. — Il a remplacé l'accumulateur Blot. Plaques positives et négatives semblables, à formation Planté. La figure 108 donne la vue d'une

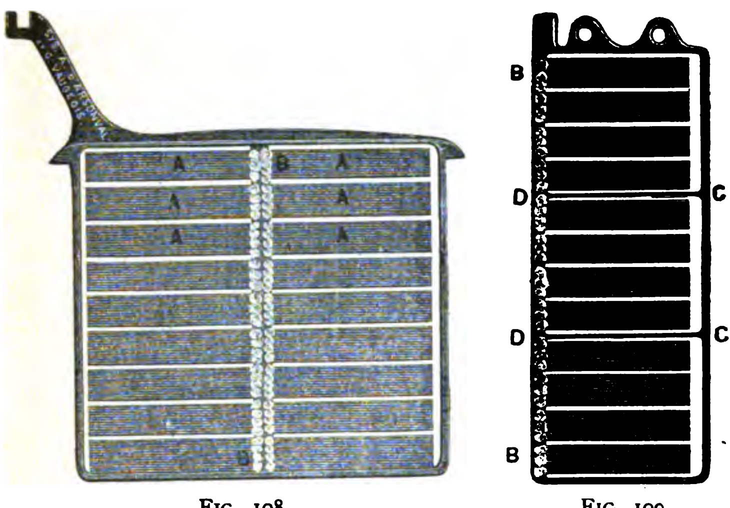


FIG. 108. FIG. 109.

plaque d'un élément stationnaire. Des faisceaux élémentaires A, A, ... viennent se souder à une nervure centrale B, B, ... se rattachant au cadre par soudure autogène.

La plaque pour éléments mobiles (fig. 109) est plus ramassée; les faisceaux de lamelles sont moins longs et simples, des barres horizontales supplémentaires CD, CD, ... réunissent les côtés verticaux du cadre.

Les faisceaux élémentaires A, A, ... comportent une âme

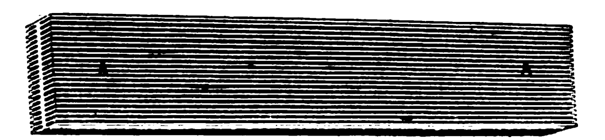


FIG. 110.

en plomb (fig. 110), dont se détachent perpendiculairement de minces et longues ailettes. Les faisceaux sont fabriqués au

moyen d'une filière spéciale. Le plomb en sort à une température voisine de la fusion, sous une pression pouvant s'élever à 2 000 kilogrammes.

Capacités en ampères-heures aux régimes de décharge en			RÉGIME de charge en ampères	POIDS total de l'élément
10 heures	5 heures	3 heures		
28	25	21	3,1	15,7
336	300	252	36,9	96,7
1 120	1 000	840	123,2	332,2

Accumulateur Lehmann. — La plaque positive, à formation Planté, présente une âme assez épaisse BB ... (fig. 111) en zig-zag pour augmenter sa rigidité. Perpendiculairement,

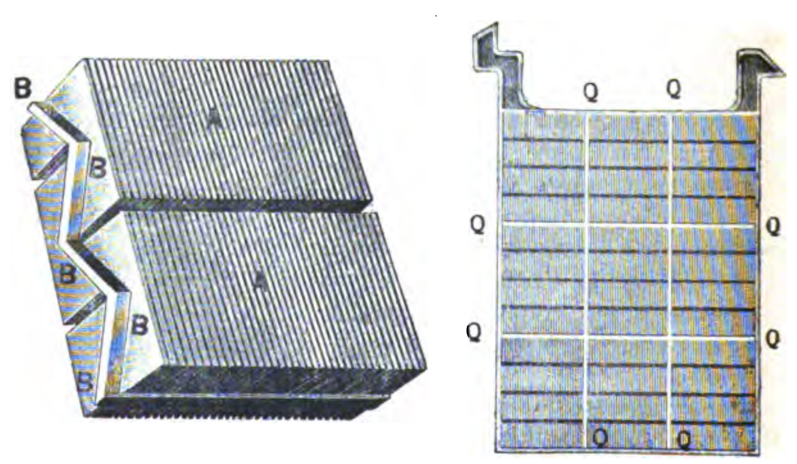


FIG. 111. FIG. 112.

venues de fonte avec elle, se trouvent des lamelles très rapprochées, d'une longueur de 1 centimètre environ.

L'ensemble est renforcé par des nervures rectangulaires QQ, QQ .. (fig. 112).

La plaque négative a pour ossature une grille en plomb antimonié, remplie de matière active fortement comprimée dans les alvéoles.

Capacité en ampères-heures aux régimes de décharge en						RÉGIME de charge en ampères		POIDS de l'élément
A			B					
10 heures	5 heures	3 heures	3 heures	2 heures	1 heure	A	B	
48	40	36	33	28	24	12	15	20
435	364	324	309	265	222	108	136	106
1 378	1 155	1 026	979	841	703	342	430	313

Accumulateur Fulmen. — Les plaques sont des grilles en plomb antimonieux enveloppées dans un étui en celluloïd perforé d'un grand nombre de petits trous. L'étui est formé de deux feuilles soudées au moyen d'une dissolution de celluloïd dans l'acétone. L'intervalle entre la grille et l'enveloppe est bourré de minium et de litharge en poudre. Cet élément a surtout été étudié en vue de la traction électrique.

Capacité en ampères-heures aux régimes de décharge en			POIDS total
8 heures	4 heures	2 heures	
35	29	27	3,1
141	115	107	10,5
246	202	188	18

Accumulateur Cheval-Lindeman. — Il appartient à la catégorie des accumulateurs à forme massive et est spécialement destiné aux véhicules. L'électrode positive est consti-

tuée par des tiges E (fig. 113) en plomb, solidement assujéties dans l'axe de boîtes carrées ABCD en ébonite, renforcées de nervures aux angles, perforées d'une infinité de petits trous et bourrées de plomb spongieux obtenu par voie chimique, transformé en peroxyde par l'application du courant. Les électrodes positives élémentaires ainsi disposées et raccordées entre elles à la partie supérieure de leurs tiges centrales par soudures autogènes, viennent s'engager à frottement doux dans des boîtes parallélipipédiques en plomb perforé, soudées sur un fond en plomb également et constituant l'électrode négative. L'intervalle de ces étuis métalliques est bourré de plomb spongieux G obtenu par un procédé analogue à celui des compartiments positifs; des lames en plomb destinées à capter le courant et soudées au fond métallique y sont noyées. Le tout est enfermé dans un bac en ébonite.

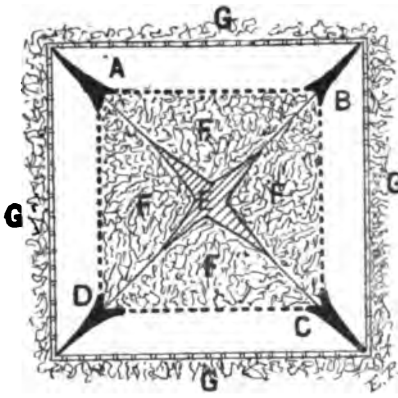


FIG. 113.

L'élément normal pèse 10 kilogrammes, se décomposant comme suit :

Boîte en ébonite	0,650
Bloc négatif	3,400
Id. positif (3 × 5 expansions)	2,950
Électrolyte	3
	10,000 kilogrammes.

Dimensions : longueur, 160 millimètres; largeur, 98 millimètres; hauteur, 270 millimètres.

L'élément est susceptible de fournir le régime de décharge de 40 ampères pendant cinq heures, soit 20 ampères-heures et 38 watts-heures par kilogramme total; courant de charge normal : 2 ampères par kilogramme total.

Puissance des accumulateurs. — Le poids d'accumulateurs nécessaire pour produire la puissance électrique disponible d'un kilowatt se détermine aisément d'après les facteurs des appareils envisagés.

Si nous prenons l'accumulateur Cheval-Lindeman, par exemple, au régime de décharge de 40 ampères, le voltage moyen étant 1,9 volt, la puissance moyenne ressortira à 76 watts par 10 kilogrammes, soit pour 1 kilowatt

$$\frac{1\,000}{76} . 10 = 131,5 \text{ kilogrammes}$$

qui pourront fournir une énergie de 131,5 . 38 = 5 kilowatts-heures.

Problème. — *Supposons qu'il y ait intérêt à utiliser des accumulateurs pour débiter sous 110 volts 49 ampères pendant trois heures, puis 25 ampères et 10 ampères respectivement pendant les deux, et quatre heures suivantes.*

Calcul du poids. — Au total la batterie devra fournir

$$49 . 3 + 25 . 2 + 10 . 4 = 237 \text{ ampères-heures}$$

avec un régime maximum de 49 ampères.

Des accumulateurs stationnaires de poids moyen, ne peuvent guère être déchargés en neuf heures à un taux supérieur à 0,4 ampère par kilogramme total. Il faudra donc, pour satisfaire au problème, des éléments pesant $\frac{49}{0,4} = 122,5$ kilogrammes. Comme la capacité est, dans ces conditions, d'environ 4 ampères-heures par kilogramme, les éléments auront une capacité totale de 122,5 . 4 = 490 ampères-heures, c'est-à-dire double de celle nécessaire, et l'on pourra n'effectuer le rechargement que tous les deux jours.

Nombre d'éléments. — Le voltage minimum des éléments étant 1,85 volt à la décharge (décharge lente), il en faudra au maximum

$$\frac{110}{1,85} = 60.$$

Il conviendra de pouvoir continuer à alimenter les circuits d'utilisation sur lesquels la tension ne peut en général varier au delà de 2 à 3 °/₀ soit 112,2 à 113,3 volts, même *pendant la charge*, c'est-à-dire quand le voltage atteint 2,4 volt et même exceptionnellement, en cas de surcharge énergique pour désulfater les plaques, 2,7 volt par élément; on devra donc ne mettre en circuit, à ce moment, que $\frac{113,3}{2,7} = 42$ éléments. Les autres éléments, dits de *réduction*, seront ajoutés lors de l'utilisation de la batterie au fur et à mesure que le voltage baissera, au moyen d'un commutateur *adjoncteur* de décharge.

On peut facilement se rendre compte que la formule donnant le nombre n des éléments de réduction est, N représentant le nombre total des accumulateurs de la batterie et E le voltage maximum des circuits d'utilisation :

$$n = \frac{N \cdot 2,7 - E}{2,7}.$$

Si la charge est effectuée en dehors des heures d'utilisation de la batterie, le nombre des éléments de réduction n'est plus que :

$$n' = \frac{N \cdot 2,1 - E}{2,1}.$$

Dans ce cas, l'adjoncteur peut être simple et servir alternativement pour la charge et pour la décharge.

Chargement de la batterie. — A la fin de la première charge, le voltage des éléments, que l'on chargera tous ensemble, sera poussé de 2,5 à 2,7 volts; la machine devra pouvoir développer 60 . 2,7 = 162 volts.

Quand la batterie est en service courant, on met en charge tous les éléments puis, ceux de réduction qui n'ont été introduits que progressivement lors de la décharge pour maintenir le voltage étant moins déchargés que les autres et par conséquent plus vite rechargés, sont éliminés successivement au moyen d'un adjoncteur de charge, quand ils ont récupéré leur décharge antérieure augmentée du pourcentage de perte.

On s'aperçoit qu'il est temps de les éliminer à l'aide des indices signalés plus haut : voltage (pris au moyen d'un petit voltmètre de 1 à 3 volts), densité, bouillonnement.

Schéma d'une installation. — D (fig. 114) dynamo en dérivation pour pouvoir faire varier le voltage en augmentant ou diminuant l'excitation des inducteurs I I au moyen du rhéostat R; F_1, F_2, fusibles de sûreté; B interrupteur automatique, pour éviter qu'en cas de ralentissement de la machine les accumulateurs se déchargent à travers celle ci en la faisant fonctionner comme moteur. L'interrupteur automatique est en général un simple électro-aimant dont l'armature maintient enclenché un interrupteur qu'un ressort ou dispositif quelconque tend à ouvrir. Dès que le courant ne possède plus l'intensité voulue, l'armature se déplace et le circuit s'ouvre; V voltmètre permettant, au moyen du commutateur C_1, de prendre le voltage, soit de la dynamo, soit des accumulateurs côté charge, ou côté décharge; A_1 ampèremètre mesurant le débit de la dynamo; C_2 commutateur de la dynamo permettant : soit de la connecter avec les accumulateurs, position de gauche; soit de l'isoler, position médiane; soit de la mettre directement sur le circuit d'utilisation, position de droite; A_2 ampèremètre marquant l'intensité du courant entrant ou

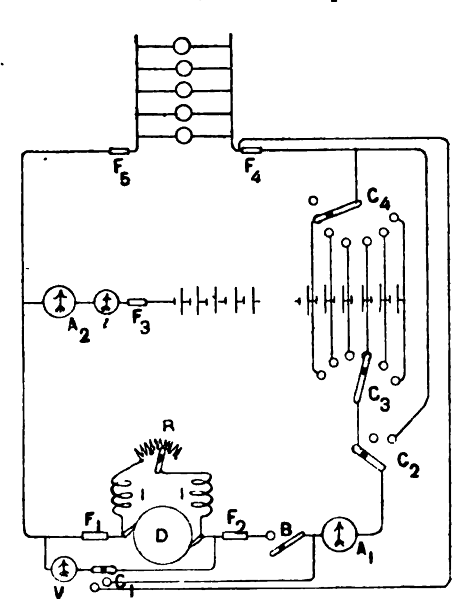


Fig. 114.

sortant de la batterie ; *i* indicateur de courant faisant connaître si la batterie est en charge ou décharge ; C_3 commutateur-adjoncteur pour la charge C_4 commutateur-adjoncteur pour la décharge.

REMARQUE SUR LA CONSTRUCTION DES ADJONCTEURS. — L'adjoncteur doit permettre d'ajouter ou de retrancher des éléments sans rupture de circuit, pour éviter la production d'étincelles et des arrêts dans l'alimentation des récepteurs. La largeur de ses balais frotteurs ou surfaces de contact devra donc être plus grande que l'espace séparant deux touches ou plots consécutifs. S'il était massif, il mettrait successivement tous les éléments de réduction en court-circuit. Pour éviter cet inconvénient, on est obligé de subdiviser ses pièces frottantes en deux parties réunies par une résistance en maillechort, souvent enroulée sous forme de boudin RR (fig. 115).

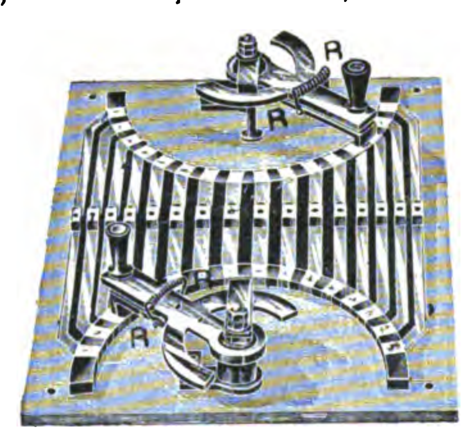


FIG. 115.

Usage des accumulateurs. — La demande de courant dans une usine est en général fort variable. Dans les installations d'éclairage, par exemple, on constate un maximum très accentué vers 17, 18 ou 19 heures, suivant la saison, puis la consommation, après s'être maintenue à un taux élevé pendant quelques heures, tombe à une faible valeur. Les accumulateurs permettent, ressource précieuse, d'éviter la marche coûteuse des machines pendant ces heures de faible débit.

Comme on peut les faire fonctionner en parallèle avec les machines, il est en outre possible de diminuer l'importance

de celles-ci dont l'utilisation devient meilleure : dans les moments de forte demande, les accumulateurs viennent en aide aux machines en débitant une partie plus ou moins grande du courant ; ils se rechargent, au contraire, quand la diminution de la consommation dépasse un certain taux.

En automobilisme, ils sont tout indiqués si l'on veut profiter des idéales qualités des moteurs électriques, qui sont : la simplicité, grande puissance volumique, bon rendement, maniement facile, faible dépense d'entretien.

Enfin, dans le cas où la charge varie brusquement et continuellement, comme dans les usines de tramways, mis en dérivation sur les circuits, en *batterie-tampon,* ils exercent un puissant effet régulateur des plus utiles au point de vue du rendement et de la conservation des machines.

CHAPITRE X

COURANT ALTERNATIF

§ 1. — GÉNÉRALITÉS.

En courant continu, le flux d'électricité était constamment dirigé dans le même sens. Avec le courant alternatif, nous trouvons des renversements périodiques de ce flux : le courant est dirigé, tantôt dans un sens, tantôt dans le sens opposé. Entre deux passages par zéro, la courbe d'intensité pourrait être quelconque, c'est-à-dire irrégulière. Pour la facilité des calculs, on admet que les variations sont régulières, c'est-à-dire que le courant affecte la forme sinusoïdale, ce qui est d'ailleurs pratiquement exact pour les machines modernes.

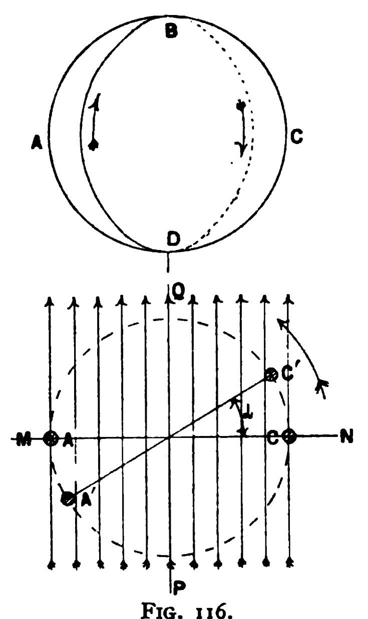


FIG. 116.

Le générateur le plus simple, produisant un tel courant, est constitué par une spire tournant dans un champ magnétique uniforme, par exemple le champ terrestre.

Soit une spire ABCD (fig. 116) animée d'une vitesse de rotation uniforme, autour d'un axe vertical BD, en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre, dans un champ magnétique de densité constante, dont la direction est normale au plan de la spire dans sa position MN.

En MN, le flux embrassé est maximum et, pendant le

temps infiniment petit dt, sa valeur ne change pas. En vertu de la loi fondamentale de l'induction

$$e = - \frac{d\mathcal{N}}{dt},$$

la force électromotrice d'induction sera nulle. A partir de ce moment, et jusque dans la position à l'angle droit PQ, le flux va en diminuant, la force électromotrice est positive. En regardant dans la direction du champ, elle est orientée dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre, donc suivant les flèches. A partir de PQ, le flux embrassé par la spire va en augmentant, la force électromotrice est négative. Mais, si l'on remarque que, par rapport à l'observateur placé en P et regardant dans le sens des lignes de force du champ, le brin BCD est maintenant passé à sa gauche et vice versa, on voit que le courant est resté de même sens dans les deux brins constitutifs de la spire.

Quand celle-ci atteint MN, le flux embrassé est derechef maximum et la force électromotrice de nouveau nulle. La spire continuant à tourner, le flux diminue et la force électromotrice devient positive, sans qu'il y ait eu cette fois, par rapport à la direction PQ, permutation de position entre les deux brins, c'est-à-dire que la force électromotrice *change de sens* dans le circuit, ce qui perdure jusqu'au moment où les conducteurs sont revenus prendre leur position initiale dans le plan MN, où la force électromotrice s'annule encore.

Nous serions arrivé plus directement au résultat en considérant que, pendant le trajet NQM le brin BCD coupe les lignes de force dans un sens, puis qu'il les coupe en sens inverse pendant le trajet consécutif MPN. L'autre brin BAD coupe simultanément le champ en sens inverse, mais comme il est monté en tension avec le premier, les forces électromotrices s'ajoutent dans la spire. Le changement de sens a lieu suivant MN; en outre, la force électromotrice développée est maximum suivant PQ, puisqu'à ce moment le nombre de lignes de force coupées par unité de temps est le plus considérable.

Période. — En résumé, pendant la durée d'une révolution complète de la spire, nous constatons la production d'une onde de force électromotrice orientée dans un certain sens, immédiatement suivie d'une onde orientée en sens inverse. La durée des deux ondes ou alternances consécutives, s'appelle *période* du courant alternatif.

Appelons $\mathcal{H}$ l'intensité du champ, s la surface de la spire dont la vitesse angulaire supposée constante $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$. L'angle décrit pendant un temps t sera $\alpha = \omega t$. Dans la position A'C', faisant un angle α avec l'axe MN, le flux traversant la boucle est

$$\mathcal{H}s \cos \alpha = \mathcal{N}.$$

La force électromotrice d'induction aura par conséquent pour expression

$$e = -\frac{d\mathcal{N}}{dt} = \mathcal{H}s \sin \alpha \frac{d\alpha}{dt} = \mathcal{H}s\omega \sin \omega t.$$

Vitesse angulaire ou pulsation de la force électromotrice. — Si T est la période, c'est-à-dire dans le cas particulier que nous étudions, la durée d'une révolution complète de la spire, correspondant à un angle 2π radians, l'angle parcouru pendant l'unité de temps, *vitesse angulaire* ou *pulsation* de la force électromotrice sera $\omega = \frac{2\pi}{T}$ radians. En remplaçant ω par sa valeur dans le sinus, nous obtenons

$$e = \mathcal{H}s\omega \sin \frac{2\pi}{T} t.$$

Pour

$$t = 0, \quad \frac{T}{4}, \quad \frac{T}{2}, \quad \frac{3}{4}T, \quad T, \quad \frac{5}{4}T, \quad \text{etc.},$$

puisque

$$\sin \frac{2\pi t}{T} = 0, \quad 1, \quad 0, \quad -1, \quad 0, \quad +1, \quad \ldots,$$

la force électromotrice passe successivement par zéro, un maximum $E = \mathcal{H}s\omega$, zéro, un minimum $-\mathcal{H}s\omega$, zéro, etc.,

et son expression en fonction du temps peut se mettre sous la forme

$$e = E \sin \frac{2\pi}{T} t.$$

C'est une sinusoïde facile à construire, en portant les temps sur un axe horizontal et les forces électromotrices correspondantes en ordonnées, courbe des *e* (fig. 117). E est l'amplitude de la force électromotrice.

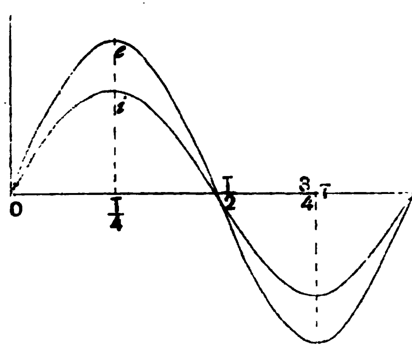


Fig. 117.

Fréquence. — Remarquons que T étant la durée d'une période, le nombre *f* de périodes par seconde ou la *fréquence* sera $\frac{1}{T} = f$ et la valeur de la force électromotrice pourra encore s'écrire :

$$e = E \sin 2\pi f t.$$

Cette formule est générale et vraie quel que soit le nombre des champs traversés par la spire pendant une révolution.

Application. — Si celle-ci a une surface de 3 centimètres carrés, tourne dans un champ de 15 gauss auquel elle est normale, et fait 1 000 tours par seconde, la force électromotrice maximum engendrée aura pour valeur

$$15 \cdot 3 \cdot 2\pi \cdot 1\,000 = 283 \cdot 10^3 \text{ unités CGS} = \frac{283 \cdot 10^3}{10^8}$$
$$= 0{,}002\,83 \text{ volt.}$$

Nous avons supposé la spire, de résistance *r*, dépourvue d'inductance, comme d'ailleurs de capacité. L'intensité du courant, donnée par la loi d'Ohm, sera :

$$i = \frac{E \sin \omega t}{r} = I \sin \omega t = I \sin \frac{2\pi}{T} t.$$

I est l'amplitude de l'intensité du courant.

La courbe d'intensité affecte donc, dans ce cas particulier, non seulement la même forme que celle de la force électromotrice, mais encore la même *phase*, c'est-à-dire qu'elle s'annule et passe par ses valeurs maxima en même temps qu'elle. En effet, pour

$$t = 0, \quad \frac{T}{4}, \quad \frac{T}{2}, \quad \frac{3}{4}T, \quad T, \quad \text{etc.},$$

i est nul, maximum, nul, minimum, nul, etc. (fig. 117, courbe des i).

COURANT ONDULÉ. — Si le courant alternatif est superposé à un courant continu d'intensité plus grande que son amplitude, on a comme résultante un courant *ondulé*, présentant simplement des maxima et minima successifs sans passages pour zéro.

COURANT PULSATOIRE. — Quand l'intensité du courant continu auquel se superpose le courant alternatif est précisément égale à son amplitude, le courant devient *pulsatoire*, c'est-à-dire croît de zéro à un maximum, décroît jusqu'à zéro, et ainsi de suite.

On obtient un tel courant, mais à ondes irrégulières, en interrompant périodiquement un courant continu.

Renversement d'un courant alternatif. — Le courant alternatif se propageant tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, il semble que le renversement d'un tel courant n'ait pas de sens physique. Il en est ainsi si l'on ne considère que la direction variable du courant; la question change de face, si l'on fait entrer en ligne de compte cet autre facteur essentiel du courant alternatif : le temps.

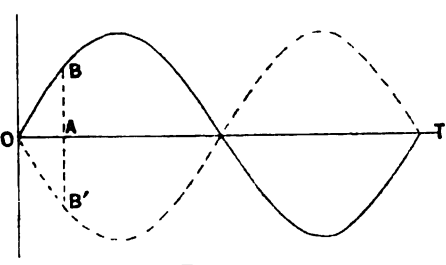


FIG. 118.

Soit un courant alternatif représenté par la sinusoïde en traits pleins (fig. 118) et traversant un appareil. Si l'on

renverse les connexions, le courant, qui avait au moment considéré la valeur positive AB, par exemple, prend immédiatement la même valeur négative AB′ courbe pointillée, ce qui revient à l'avancer d'une demi-période. Donc, ***quand on renverse un courant alternatif, on le décale en avant de π radians ou d'une demi-période.***

Force électromotrice effective. — De la dernière équation écrite plus haut nous tirons : $E \sin \omega t = ri = rI \sin \omega t$. Donc, comme en courant continu, pour faire traverser la résistance r par le courant $I \sin \omega t$, nous devons appliquer à ses bornes la force électromotrice *effective* $e_e = rI \sin \omega t$, égale à chaque instant au produit de la résistance par la valeur instantanée de l'intensité du courant.

Intensité et force électromotrice efficaces. — Quelle que soit la forme de la courbe d'intensité qu'affecte le courant alternatif, la puissance qu'il est susceptible de développer se traduira uniquement sous forme de chaleur, en l'absence de récepteur dans le circuit. L'intensité repassant successivement par les mêmes valeurs pendant les diverses périodes, nous pouvons borner notre examen à une seule période, pendant laquelle l'énergie calorifique dépensée est

$$\int_0^T ri^2 dt = rI^2 \int_0^T \sin^2 \omega t \, dt = \frac{rI^2}{2} T.$$

Cette quantité de chaleur, que l'on pourra utiliser plus ou moins complètement, représente donc, en somme, l'*efficacité* du courant alternatif. Pour l'apprécier, le moyen le plus commode est de la comparer avec l'effet calorifique produit par un courant continu, de sorte que, par définition, ***l'intensité efficace d'un courant alternatif est l'intensité du courant continu qui, traversant la même résistance, y développe la même quantité de chaleur pendant le même temps.*** Soit X l'intensité du courant continu équivalent. Pendant le temps T, il développe l'effet Joule rX^2T.

Nous aurons

$$rX^2T = \frac{rI^2}{2}T, \quad \text{d'où} \quad X = \frac{I}{\sqrt{2}}.$$

L'intensité efficace d'un courant alternatif est donc égale à son intensité maximum, divisée par $\sqrt{2}$.

Par analogie, on désigne sous le nom de *force électromotrice efficace* l'expression $\frac{E}{\sqrt{2}}$.

Utilité de la notion de l'intensité efficace. — L'utilité de la notion de l'intensité efficace est donc de permettre de traiter le courant alternatif comme un courant continu *au point de vue de l'effet Joule.* On a, en effet : chaleur développée dans un conducteur de résistance r par un courant alternatif d'intensité efficace $i_{eff} = ri^2_{eff}$.

Les appareils de mesure donnent les valeurs efficaces. — Il est d'ailleurs à remarquer que ce sont les valeurs efficaces qu'indiquent les appareils de mesure. Un galvanomètre ordinaire inséré dans un circuit alternatif ne marque rien, son équipage ayant trop d'inertie pour suivre des variations aussi rapides que celles du courant alternatif, dont la fréquence industrielle est d'environ 50. Il faut donc se servir de l'électrodynamomètre, dont les indications sont proportionnelles à chaque instant à i^2, soit au total à la moyenne des carrés des intensités. Or, cette moyenne

$$\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt = \frac{I^2}{2},$$

dont la racine carrée que marque l'instrument, soit $\frac{I}{\sqrt{2}}$, est précisément l'intensité efficace.

Intensité et force électromotrice moyennes. — L'intensité moyenne du courant est évidemment nulle. Mais on a l'habitude de considérer comme intensité moyenne, la

moyenne des valeurs successives que prend le courant pendant une demi-période

$$i_m = \frac{1}{\frac{T}{2}} \int_0^{\frac{T}{2}} idt = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} I \sin \omega t \, dt = \frac{2I}{\pi}.$$

Son rapport à l'intensité efficace

$$\frac{i_m}{i_{eff}} = \frac{2I\sqrt{2}}{\pi I} = 0{,}9,$$

c'est-à-dire que les indications de l'électrodynamomètre doivent être réduites d'un dixième, pour donner le courant moyen.

Les mêmes considérations s'appliqueraient aux forces électromotrices moyenne et efficace.

Effet de la selfinductance et de la capacité. — Supposons maintenant le circuit constitué par une résistance r (fig. 119), douée d'une selfinductance $\mathfrak{L}$ henrys, embrochée en série avec un condensateur de capacité c farads. Cherchons quelle force électromotrice nous devrons appliquer à ses extrémités, pour que le courant $i = I \sin \omega t$ le traverse.

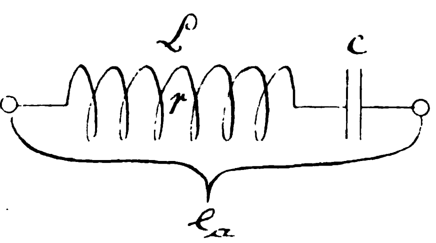


FIG. 119.

Nous venons de voir que pour faire passer le courant $I \sin \omega t$ à travers la résistance r, nous devons appliquer à celle-ci une force électromotrice effective $e_e = rI \sin \omega t$.

Du fait de la selfinductance, il naît à chaque instant, dans l'enroulement de résistance r, une force électromotrice $-\mathfrak{L}\frac{di}{dt}$ dirigée, comme son signe l'indique, en sens inverse du courant. Pour que l'intensité du courant n'en puisse être affectée, il faudra continuellement vaincre cette force électro-

motrice parasite par une force électromotrice égale et de sens contraire, dite de ***selfinduction***,

$$e_s = -\left(-\mathcal{L}\frac{di}{dt}\right) = \mathcal{L}I\omega \cos \omega t.$$

Voyons maintenant comment agit le condensateur. Il est traversé par le courant et, de ce fait, se charge. Au bout du temps t, ses armatures retiennent la quantité d'électricité

$$\int_0^t I \sin \omega t \, dt = \frac{I}{\omega} - \frac{I}{\omega} \cos \omega t \text{ coulombs.}$$

Pour embrasser le problème dans toute sa généralité, nous devons lui supposer une certaine charge initiale que nous désignerons, pour simplifier, par $q_0 - \frac{I}{\omega}$, quitte à déterminer l'inconnue q_0 par les conditions du problème.

A l'époque t, la charge du condensateur sera donc

$$q_0 - \frac{I}{\omega} + \frac{I}{\omega} - \frac{I}{\omega} \cos \omega t = q_0 - \frac{I}{\omega} \cos \omega t,$$

et la différence de potentiel de ses armatures sera, en vertu de la formule générale $Q = CV$ ou $V = \frac{Q}{C}$,

$$\frac{q_0}{c} - \frac{I}{\omega c} \cos \omega t.$$

Voyons quel est son signe. Cette différence de potentiel est orientée en sens inverse du courant qui lui donne naissance. Elle a donc pour valeur, en tenant compte des signes adoptés

$$-\left(\frac{q_0}{c} - \frac{I}{\omega c} \cos \omega t\right).$$

Pour qu'elle ne puisse, elle non plus, réagir sur le courant $I \sin \omega t$, il faudra également la contre-balancer à chaque instant par une force électromotrice égale et contraire dite de *capacité*

$$e_c = -\left[-\left(\frac{q_0}{c} - \frac{1}{\omega c} \cos \omega t\right)\right] = \frac{q_0}{c} - \frac{I}{\omega c} \cos \omega t \text{ volts.}$$

En résumé, pour faire traverser par un courant $I \sin \omega t$ ampères un circuit comprenant une résistance r ohms, un

coefficient de selfinduction $\mathcal{L}$ henrys et une capacité c farads, il faudra appliquer à ses bornes :

1° Une force électromotrice effective e_e égale à chaque instant à l'intensité du courant multipliée par la résistance ohmique du circuit

$$e_e = r\mathrm{I} \sin \omega t;$$

2° Une force électromotrice de selfinduction équilibrant à chaque instant la force contre-électromotrice due à la self-inductance

$$e_s = \mathcal{L}\mathrm{I}\omega \cos \omega t;$$

3° Une force électromotrice de capacité contre-balançant à chaque instant la force contre-électromotrice due à la charge du condensateur

$$e_c = \frac{q_0}{c} - \frac{\mathrm{I}}{\omega c} \cos \omega t.$$

La force électromotrice *totale* ou *agissante* ou *appliquée* e_a qu'il y aura lieu de développer aux bornes du circuit pour le faire traverser par le courant I sin ωt sera à chaque instant la somme de ces trois forces électromotrices :

$$e_a = e_e + e_s + e_c = r\mathrm{I} \sin \omega t + \left(\omega\mathcal{L} - \frac{1}{\omega c}\right) \mathrm{I} \cos \omega t + \frac{q_0}{c}.$$

La forme du second membre indique que e_a est le sinus d'une somme d'arcs. Comme ce sinus doit contenir le terme périodique ωt, nous poserons

$$e_a = \mathrm{E}_a \sin(\omega t + \varphi) = \mathrm{E}_a \cos\varphi \sin \omega t + \mathrm{E}_a \sin\varphi \cos \omega t.$$

En identifiant avec le second membre de l'équation précédente, nous obtiendrons les équations de condition

$$\mathrm{E}_a \cos\varphi = r\mathrm{I}\,;\ \mathrm{E}_a \sin\varphi = \left(\omega\mathcal{L} - \frac{1}{\omega c}\right)\mathrm{I}\,;\ \frac{q_0}{c} = 0,$$

d'où

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\omega\mathcal{L}}{r} - \frac{1}{\omega c r}.$$

Nous voyons que la force électromotrice appliquée est en avance de φ radians sur le courant, ou inversement, celui-ci

est en arrière de la même quantité sur la force électromotrice appliquée. Dès lors, quand celle-ci est $E_a \sin \omega t$, le courant a pour valeur

$$i = I \sin(\omega t - \varphi) = \frac{E_a \cos \varphi}{r} \sin(\omega t - \varphi).$$

Le courant est donc décalé en arrière, sur la force électromotrice agissante, de l'angle φ radians ou $\frac{\varphi \cdot 360}{2\pi}$ degrés (fig. 120). Ses maxima, minima, passages par zéro, ses diverses phases en un mot, se trouvent retardées sur les phases correspondantes de la force électromotrice appliquée d'un temps $\frac{\varphi}{\omega}$ secondes. En outre, l'intensité se trouve réduite dans la proportion de cos φ, car s'il n'existait dans le circuit qu'une résistance, on aurait simplement, comme nous l'avons vu précédemment,

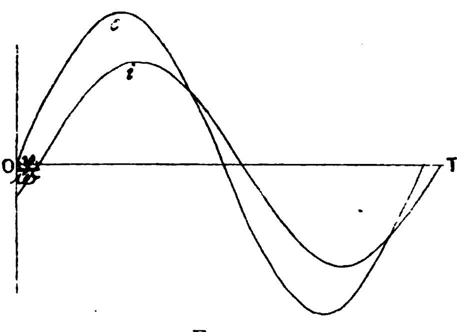


FIG. 120.

$$i = \frac{E_a}{r} \sin \omega t.$$

Voyons ce que deviennent les valeurs efficaces, les plus intéressantes en pratique :

$$i_{\text{eff}} = \frac{I}{\sqrt{2}}; \qquad e_{a\,\text{eff}} = \frac{E_a}{\sqrt{2}},$$

d'où

$$i_{\text{eff}} = e_{a\,\text{eff}} \frac{I}{E_a} = e_{a\,\text{eff}} \frac{\cos \varphi}{r} = \frac{e_{a\,\text{eff}}}{\sqrt{r^2 + \left(\omega \mathfrak{L} - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

Telle est l'équation fondamentale des courants alternatifs, et nous trouvons ici une différence essentielle avec le courant continu : dans l'application de la loi d'Ohm, il y a éventuel-

lement lieu de tenir compte, outre de la résistance r, des trois nouveaux facteurs ω, $\mathfrak{L}$ et c, ou du décalage du courant si on le connaît.

Application. — Supposons

$$e_{a\,\text{eff}} = 1\,000\ \text{V}, \quad r = 500\ \text{O}, \quad \mathfrak{L} = 10\ \text{H}, \quad c = 25 \text{ microfarads,}$$

et une fréquence de 15 donnant $\omega = 2\pi f = 94,25$ radians. On trouve $i_{\text{eff}} = \frac{1\,000}{720} = 1,39$ A. Si le circuit avait été dépourvu de selfinductance et de capacité, l'intensité du courant eût été $i_{\text{eff}} = \frac{1\,000}{500} = 2$ A, soit 1,44 fois la valeur précédente.

Résistance apparente ou impédance, réactance. — Le dénominateur de l'expression de i_{eff}, qui joue le rôle d'une résistance et s'exprime d'ailleurs en ohms, porte le nom de *résistance apparente du circuit* ou *impédance*. Ce n'est, en effet, que la résistance *apparente*, puisque la *vraie* résistance reste r. Elle s'obtient en divisant, comme au courant continu, la force électromotrice appliquée par l'intensité du courant. On a en effet

$$r_{\text{app}} = \frac{e_{a\,\text{eff}}}{i_{\text{eff}}} = \frac{r}{\cos\varphi}.$$

La résistance apparente est fonction de la fréquence, puisque $\omega = 2\pi f$, et ne tombe jamais au-dessous de la résistance r mesurée en courant continu. On voit que c'est le *facteur par lequel il faut multiplier l'intensité efficace pour obtenir la force électromotrice efficace appliquée.*

Graphiquement, on le déterminera en construisant un triangle rectangle dont les deux côtés de l'angle droit sont la résistance r et le terme $\omega\mathfrak{L} - \frac{1}{\omega c}$, qui porte le nom de *réactance du circuit*. On remarquera que l'angle opposé à la réactance est précisément l'angle φ. Car on a $\operatorname{tg}\varphi = \frac{\textit{réactance}}{\text{résistance}}$.

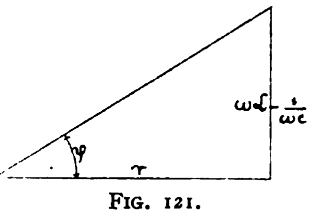


Fig. 121.

En reprenant l'exemple numérique traité ci-dessus, nous voyons qu'il faudra porter sur un des côtés de l'angle droit

la longueur 500; sur l'autre $94,25 \cdot 10 - \frac{10^6}{94,25 \cdot 25} = 517,5$. L'hypothénuse a bien la longueur 720 déduite moins aisément par le calcul.

REMARQUE I. — L'effet Joule est toujours donné par l'expression $i^2_{eff}\, r$, dans laquelle r représente la résistance et *non l'impédance.*

REMARQUE II. — A moins de rendre la selfinductance de leurs bobines négligeable, les appareils de mesure des courants alternatifs devront être étalonnés pour une fréquence donnée, en dehors de laquelle leurs indications ne sont plus exactes.

Cas particuliers. — RÉSONNANCE. — Le signe négatif dont est affecté le terme dû à la capacité montre que celle-ci joue un rôle inverse à la selfinductance. Elle annulera complètement l'effet de cette dernière quand

$$\omega \mathcal{L} - \frac{1}{\omega c} = 0 \qquad \text{ou} \qquad \omega^2 \mathcal{L} c = 1.$$

On dit alors qu'il y a *résonnance;* l'impédance du circuit se confond avec la résistance, et le courant est en concordance de phase avec la force électromotrice.

RÉACTANCE DE SELFINDUCTION. — S'il n'existe pas de condensateur dans le circuit, le terme en c disparaît, la résistance apparente se réduit à la valeur

$$\sqrt{r^2 + \omega^2 \mathcal{L}^2} \quad \text{et} \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega \mathcal{L}}{r}.$$

Par conséquent, la selfinductance seule décale le courant en arrière de la force électromotrice et diminue son intensité. Le terme $\omega \mathcal{L}$ ou $\frac{2\pi}{T} \mathcal{L}$ a reçu le nom de *réactance de selfinduction.*

Quand r est négligeable devant $\omega \mathcal{L}$, il vient

$$i_{eff} = \frac{e_{eff}}{\omega \mathcal{L}}$$

$\operatorname{tg} \varphi$ est très grande et le décalage en arrière approche de $\frac{\pi}{2}$.

Application. — Soient $e_{eff} = 1\,000$ V, $r = 1$ O, $\mathcal{L} = 10$ H, $f = 15$, d'où $\omega = 94,25$; on trouve $i_{eff} = 1,06$ A et $\varphi = 90°$.

Capacitance. — Si $\mathcal{L} = 0$, la résistance apparente devient

$$\sqrt{r^2 + \frac{1}{\omega^2 c^2}} \text{ avec } \operatorname{tg} \varphi = -\frac{1}{\omega c r}.$$

On voit que l'effet de la capacité seule est de donner à φ une valeur négative, c'est-à-dire de décaler le courant *en avant*, en même temps que l'intensité est diminuée.

Le terme $\frac{1}{\omega c}$ s'appelle *réactance de capacité* ou *capacitance*.

Quand la capacité intercalée dans le circuit est très faible, r devient négligeable devant $\frac{1}{\omega c}$ et il reste

$$i_{eff} = \omega c\, e_{eff},$$

tg φ est très grande et le décalage en avant approche de $\frac{\pi}{2}$.

Application. — Pour $e_{eff} = 1\,000$ V ; $\omega = 94,25$, $r = 1$ O et $c = 1$ microfarad : $i_{eff} = 94,25 \cdot 10^{-6} \cdot 1\,000 = 0,09425$ A, courant exclusivement dû à la charge du condensateur coupant le circuit et $\varphi = 90°$.

Décalage des diverses forces électromotrices. — Le courant étant $i = I \sin \omega t$, nous avons vu que

$$e_s = \mathcal{L} I \omega \cos \omega t = \mathcal{L} I \omega \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$$

ce qui indique que la force électromotrice de selfinduction est décalée d'un angle $\frac{\pi}{2}$ en avant sur le courant. Celui-ci étant en arrière de φ sur la force électromotrice appliquée, la force électromotrice de selfinduction sera $\frac{\pi}{2} - \varphi$ en avant sur cette dernière.

Quant à la force électromotrice de capacité, puisque $q_0 = 0$,

$$e_c = -\frac{I}{\omega c} \cos \omega t = \frac{I}{\omega c} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

elle est décalée de $\frac{\pi}{2}$ en arrière sur le courant et de $\frac{\pi}{2} + \varphi$ en arrière sur la force électromotrice appliquée.

En résumé nous pouvons dresser le tableau suivant :

FACTEUR considéré	VALEURS maxima	DÉCALAGE par rapport au courant	DÉCALAGE par rapport à la force électromotrice appliquée
i	$I = \frac{E_a \cos \varphi}{r}$	o	φ en arrière
e_a	$E_a = \frac{Ir}{\cos \varphi}$	φ en avant	o
e_e	$rI = E_a \cos \varphi$	o	φ en arrière
e_s	$\mathcal{L}I\omega = \frac{\mathcal{L}E_a \cos\varphi\, \omega}{r}$	$\frac{\pi}{2}$ en avant	$\frac{\pi}{2} - \varphi$ en avant
e_c	$\frac{I}{\omega c} = \frac{E_a \cos \varphi}{\omega c r}$	$\frac{\pi}{2}$ en arrière	$\frac{\pi}{2} + \varphi$ en arrière

Remarques. — I. Les intensités et forces électromotrices efficaces ne différant des valeurs maxima des fonctions périodiques auxquelles elles se rapportent que par le facteur constant $\frac{1}{\sqrt{2}}$, dès que l'on connaît les unes on connaît les autres et réciproquement.

II. Les valeurs efficaces possèdent, l'une par rapport à l'autre, les mêmes décalages que les valeurs périodiques dont elles dérivent.

III. Pour composer entre elles des valeurs efficaces, tant d'intensités que de forces électromotrices, il faudra donc tenir compte de leurs décalages. Considérons, par exemple, deux courants sinusoïdaux de mêmes période et intensité efficace, mais décalés de π radians l'un par rapport à l'autre. Traversant des circuits différents, ils pourront y produire des effets calorifiques en rapport avec leur puissance; mais si on les envoie dans le *même circuit,* à chaque intensité

positive de l'un correspondra la même intensité négative de l'autre et vice versa, de sorte que leur résultante *sera nulle*, il n'y aura plus de courant. La seule connaissance des valeurs efficaces des courants alternatifs ne suffit donc pas, il faut aussi connaître les décalages qu'elles peuvent présenter l'une par rapport à l'autre, pour pouvoir déterminer leurs effets résultants.

IV. Les sinus ayant des valeurs égales et contraires, pour des angles différant de π ou d'un multiple entier impair de π, on voit que pour annuler à chaque instant une force électromotrice sinusoïdale, il suffira d'introduire dans le circuit une force électromotrice de même période et même amplitude que celle-ci, mais dont la phase soit en avance ou en arrière de celle qu'il s'agit d'annuler, de π ou d'un multiple impair de π. En d'autres termes, cette force électromotrice doit être décalée par rapport à l'autre de π ; 3,14 radians; de 180° ou d'un multiple impair de ces quantités.

V. $\cos \omega t = \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$. Donc, quand nous rencontrerons une fonction de même périodicité, mais en cosinus, nous pouvons immédiatement conclure qu'elle est décalée de $\frac{\pi}{2}$ en avant sur celle en sinus. Exemple : la force électromotrice de selfinduction par rapport à l'intensité du courant.

VI. $-\cos \omega t = +\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$. Quand nous rencontrerons une fonction de même périodicité mais en cosinus et affectée du signe —, nous conclurons immédiatement qu'elle est décalée de $\frac{\pi}{2}$ en arrière sur la valeur positive correspondante en sinus. Exemple : la force électromotrice de capacité par rapport à l'intensité du courant.

Puissance des courants alternatifs. — En courant continu, la puissance développée par un courant d'intensité I sous la différence de potentiel E est EI. Cette formule est également vraie pour le courant alternatif, à condition de l'appliquer pendant une durée telle que l'intensité et la force électromotrice puissent être considérées comme constantes, c'est-à-dire pendant un temps infiniment petit.

COURANT EN CONCORDANCE DE PHASE. — S'il n'existe aucun décalage entre le courant et la force électromotrice, on a à chaque instant

$$ei = E \sin \omega t \,.\, I \sin \omega t = EI \sin^2 \omega t.$$

La puissance est toujours positive. L'énergie développée pendant une période sera

$$EI \int_0^T \sin^2 \omega t \,.\, dt = EI \left[\frac{t}{2} - \frac{\sin 2\omega t}{4\omega} \right]_0^T = \frac{EI}{2} T,$$

d'où résulte une puissance moyenne

$$\frac{EI}{2} = i_{eff}\, e_{eff}.$$

Donc, ***en l'absence de différence de phase, la puissance est simplement égale au produit de l'intensité efficace par la différence de potentiel efficace.***

Par exemple, la force électromotrice effective, qui est en concordance avec le courant, fournira au circuit une puissance moyenne $\frac{E_e I}{2}$. Le maximum de $e_e = rI \sin \omega t$ a lieu quand le sinus est égal à l'unité, donc $E_e = rI = E_a \cos \varphi$. Par conséquent, la puissance moyenne de la force électromotrice effective

$$= \frac{E_e I}{2} = \frac{E_a \cos \varphi\, I}{2} = e_{a\, eff}\, i_{eff} \cos \varphi.$$

COURANT DÉCALÉ DE $\frac{\pi}{2}$. — Si le courant est décalé de $\frac{\pi}{2}$ en avant ou en arrière de la force électromotrice, on aura à chaque instant

$$ei = E \sin \omega t \,.\, I \sin \left(\omega t \pm \frac{\pi}{2} \right) = \pm EI \sin \omega t \cos \omega t = \pm \frac{EI}{2} \sin 2\omega t.$$

La puissance varie proportionnellement à un sinus. Elle est donc tantôt positive, tantôt négative, et l'énergie dépensée en une demi-période a pour valeur

$$\pm \frac{EI}{2} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin 2\omega t = \mp \frac{EI}{4\omega} \left[\cos 2\omega t \right]_0^{\frac{T}{2}} = 0.$$

Quand le décalage du courant est $\frac{\pi}{2}$ en avant ou en arrière sur la force électromotrice, l'énergie dépensée pendant un nombre quelconque de demi-périodes est nulle. En d'autres termes, le courant absorbe pendant une partie de la demi-période, l'énergie qu'il avait développée pendant l'autre partie. On peut facilement s'en convaincre par la construction graphique.

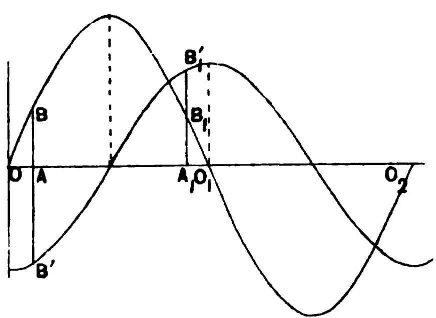


Fig. 122.

Traçons les sinusoïdes de la force électromotrice et de l'intensité du courant (fig. 122). Élevons une perpendiculaire au point de passage par zéro de la force électromotrice o_1, portons des longueurs égales à droite et à gauche de o et o_1, puis menons en ces points les ordonnées des deux courbes. Nous aurons d'un côté deux ordonnées de signe contraire dont le produit est négatif; de l'autre, deux ordonnées de même signe respectivement égales aux premières, dont le produit est positif; la somme = o. A chaque valeur de la puissance correspond dans la même demi-période une valeur égale et contraire, de sorte que la puissance moyenne totale est nulle.

En conséquence, les forces électromotrices de selfinduction et de capacité, décalées par rapport au courant respectivement de $\frac{\pi}{2}$ en avant et en arrière, ne fournissent pas d'énergie au circuit et la puissance moyenne totale développée

$$(e_a i)_{moy} = (e_e i)_{moy} + (e_s i)_{moy} + (e_c i)_{moy} = e_{a\,eff}\, i_{eff} \cos \varphi.$$

On serait arrivé directement à cette formule, en calculant quelle est la chaleur développée dans le circuit pendant une période, aucun récepteur n'y existant. La chaleur moyenne produite est

$$\frac{1}{T}\int_0^T i^2 r dt = \frac{rI^2}{2} = \frac{E_a \cos \varphi}{2} I = e_{a\,eff}\, i_{eff} \cos \varphi.$$

En résumé, une force électromotrice alternative $E_a \sin \omega t$, engendrant le courant

$$i = I \sin(\omega t - \varphi) = \frac{E_a \cos \varphi}{r} \sin(\omega t - \varphi),$$

développe une puissance moyenne

$$\frac{E_a I}{2} \cos \varphi = e_{eff}\, i_{eff} \cos \varphi.$$

Donc, seconde différence essentielle avec la façon de procéder en courant continu : *quand un courant alternatif est décalé sur sa force électromotrice, la puissance qu'il développe s'obtient en faisant le produit de la force électromotrice efficace par l'intensité efficace et le cosinus de l'angle de décalage.*

VARIATION DE LA PUISSANCE PENDANT LA PÉRIODE. — Il est à remarquer que la puissance est loin d'être constante pendant une période. Si l'on se reporte au diagramme de la figure 120, on verra qu'en partant de l'origine, pendant toute la durée $\frac{\varphi}{\omega}$ secondes, les ordonnées des courbes de la force électromotrice et de l'intensité sont de signes contraires ; la puissance est négative, le circuit absorbe de l'énergie, c'est-à-dire, si nous considérons que le circuit est l'induit d'un alternateur, le générateur de courant alternatif fonctionne alors comme moteur. Il en est de même après une demi-période. Il y a là un effet analogue à celui que produit le volant d'une machine irrégulière, qui entraîne son moteur à certains moments, par suite de l'énergie qu'il a emmagasinée. Au contraire, pendant les autres parties de la période, les deux ordonnées sont de même signe et la puissance développée est positive ; la machine fonctionne comme génératrice.

Facteur de puissance. — Le facteur supplémentaire introduit par le décalage du courant sur la force électromotrice porte le nom de *facteur de puissance.* C'est la quantité par laquelle il faut multiplier les *watts apparents,* produit de la force électromotrice et de l'intensité efficaces mesurées au moyen d'un voltmètre et d'un électrodynamomètre, pour obtenir la *puissance réelle* dépensée dans le circuit.

Nous avons vu plus haut que l'impédance $= \frac{r}{\cos\varphi}$, d'où $\cos\varphi = \frac{\text{resistance}}{\text{impédance}}$.

Le facteur de puissance est donc égal au rapport de la résistance à l'impédance.

Le cosinus étant toujours plus petit que l'unité, pour faire développer par un récepteur quelconque une puissance déterminée

$$P = e_{\text{eff}}\, i_{\text{eff}} \cos\varphi,$$

on sera amené à majorer soit e_{eff}, soit i_{eff}, soit tous les deux. L'élévation du voltage rend plus difficile l'isolation des circuits et le prix d'établissement des canalisations augmente; la majoration de l'intensité donne une plus grande perte par effet Joule, de sorte qu'il y a un grand intérêt économique à réduire le plus possible le décalage.

D'après la formule

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\omega\mathcal{L}}{r} - \frac{1}{\omega c r} = \frac{2\pi f\mathcal{L}}{r} - \frac{1}{2\pi f c r},$$

on voit que φ dépend de la fréquence qu'on n'est en général pas maître de modifier une fois les machines établies, de $\mathcal{L}$ et de c. L'insertion de condensateurs de capacité appropriée dans le circuit, permettrait de réduire φ à zéro, mais les condensateurs industriels coûtent cher et leur emploi est précaire.

Si les machines ne fournissent pas des courants exactement sinusoïdaux, on détermine le facteur de puissance en faisant le rapport de la puissance réelle produite, mesurée au moyen d'un wattmètre, à la puissance apparente déterminée à l'aide d'un voltmètre et d'un électrodynamomètre branchés sur le circuit. On exprime souvent cette dernière en *kilovolts-ampères.*

Courants wattés et déwattés. — Développons l'expression donnant l'intensité d'un courant décalé sur sa force électromotrice $e = E \sin \omega t$ de la quantité φ radians.

$$i = I \sin(\omega t - \varphi) = I \cos\varphi \sin\omega t - I \sin\varphi \cos\omega t$$
$$= I \cos\varphi \sin\omega t + I \sin\varphi \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Le courant décalé par suite de la réactance du circuit peut donc être considéré comme étant à chaque instant la somme de deux courants alternatifs de même période, mais d'amplitudes différentes I cos φ et I sin φ, dont le premier est en concordance de phase avec la force électromotrice et le second en retard sur celle-ci de $\frac{\pi}{2}$. Le second courant ne développera donc aucune énergie; c'est une *composante* ou *courant déwatté*. Le premier seul, appelé *composante* ou *courant watté*, fournira de l'énergie au circuit, ce qui nous permet d'écrire directement pour la valeur moyenne de la puissance développée

$$\frac{\text{EI} \cos \varphi}{2} = e_{\text{eff}}\, i_{\text{eff}} \cos \varphi.$$

Représentation graphique des fonctions sinusoïdales (*). — On rencontre à chaque instant, dans l'étude des courants alternatifs, des fonctions sinusoïdales, de même périodicité, de la forme

$$e = \text{E} \sin \omega t, \quad e' = \text{E}' \sin \omega t',$$

qu'il s'agit d'additionner, soustraire, multiplier ou diviser entre elles. Ces opérations ne s'effectuent algébriquement qu'au prix d'une certaine difficulté. Par les représentations vectorielles, au contraire, on les résout aisément.

La sinusoïde $e = \text{E} \sin \omega t = \text{E} \sin \frac{2\pi}{\text{T}} t$ est complètement définie dès que l'on connaît son amplitude E, sa période T et l'angle $\omega t = \frac{2\pi}{\text{T}} t = \frac{360}{\text{T}} t = \alpha°$ qu'elle fait au moment t, avec une direction fixe de repère.

Traçons deux axes rectangulaires OX, OY (fig. 123) et une droite OA sur laquelle nous portons une longueur OA = E, faisant avec l'axe des X l'angle α. La projection Oa de OA sur l'axe des Y sera Oa = OA cos AOY = OA sin α, et l'on voit qu'en faisant tourner OA dans le sens de la flèche, de manière qu'elle fasse un tour en T secondes, et la projetant constamment sur l'axe des Y, les projections successives

(*) VOYER, *Théorie élémentaire des courants alternatifs*. Carré, Paris.

donneront la fonction sinusoïdale considérée. OA est appelée le *vecteur représentatif* de cette fonction. On suppose que le vecteur tourne en sens inverse des aiguilles d'une montre; l'angle α est alors compté positivement; il serait compté négativement au sens contraire, symétriquement à l'axe des X. De même OA est la direction positive du vecteur, OA′, porté en sens inverse à partir de O, est sa direction négative à l'instant considéré. Traçons un second vecteur OB faisant un angle β avec l'axe des X. OB est en avance sur OA de l'angle $\beta - \alpha$, différence de phase ou décalage des deux sinusoïdes représentées. On a $Ob = OB \sin \beta$.

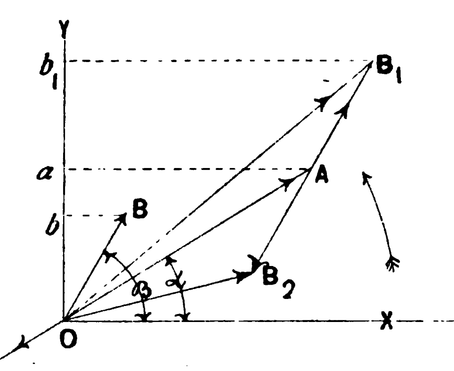


FIG. 123.

Portons, à partir du point A, un vecteur AB_1 égal et parallèle à OB et joignons B_1 à l'origine.

Si nous projetons le vecteur OB_1 sur l'axe des Y, nous obtenons une longueur Ob_1. Il est facile de voir que

$$Ob_1 = Oa + ab_1 = Oa + Ob,$$

ou, en appelant γ l'angle de OB_1 avec l'axe des X,

$$OB_1 \sin \gamma = OA \sin \alpha + OB \sin \beta,$$

c'est-à-dire que le vecteur OB_1 représentera la sinusoïde somme des sinusoïdes correspondant aux vecteurs OA et OB.

Donc, *pour additionner deux ou plusieurs grandeurs sinusoïdales, il suffit de composer leurs vecteurs représentatifs suivant le parallélogramme des forces; le vecteur résultant représentera en grandeur et en phase la sinusoïde somme de toutes les autres.*

S'il s'agit de les soustraire, on les composera encore de la même manière, mais en ayant soin de prendre pour vecteur représentatif des négatives des vecteurs négatifs, c'est-à-dire égaux et diamétralement opposés.

Pour soustraire les sinusoïdes OA et OB, on portera à l'extrémité de A et en sens inverse de OB un vecteur AB_2. Le vecteur résultant OB_2 représentera la sinusoïde différence des deux autres.

Application. — Comme exemple, reprenons le cas exposé précédemment, où nous avions :

$$e_a = e_e + e_s + e_c$$
$$= rI \sin \omega t + \omega \mathcal{L} I \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{I}{\omega C} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Nous obtiendrons la sinusoïde résultante représentant la force électromotrice appliquée, en composant les valeurs maxima ou amplitudes des trois sinusoïdes élémentaires et tenant compte de leurs décalages.

Soient OM (fig. 124) le vecteur de la force électromotrice effective maximum, obtenu en portant de l'origine, sur une droite OM faisant un angle ωt avec OX la longueur rI ; $ON = \omega \mathcal{L} I$ le vecteur de la force électromotrice maximum de selfinduction et $OP = \frac{I}{\omega c}$ celui de la force électromotrice maximum de capacité. La composition nous donnera pour force électromotrice résultante E_a, la droite OP′ qui représentera en grandeur, direction et phase, la force électromotrice appliquée maximum. En faisant tourner l'ensemble OMN′P′O autour de O en sens inverse des aiguilles d'une montre et projetant les

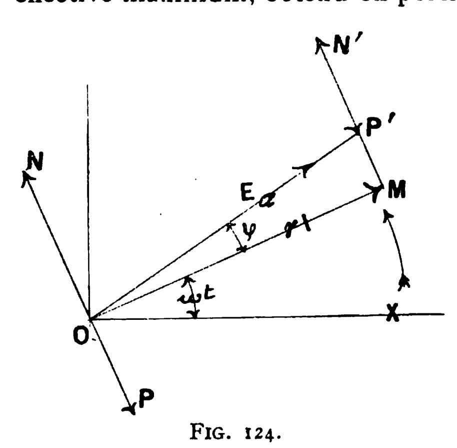


Fig. 124.

droites OM, MN′, N′P′ et OP′ sur OY, ces projections donneront à chaque instant les valeurs des diverses forces électromotrices en jeu.

On voit immédiatement que, si la selfinductance l'emporte sur la capacité, le courant est décalé en arrière sur la force électromotrice appliquée, d'un angle φ donné par la relation

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\omega \mathfrak{L} I - \frac{I}{\omega c}}{r I} = \frac{\omega \mathfrak{L}}{r} - \frac{1}{\omega c r}.$$

D'autre part, le triangle rectangle OMP′ nous donne encore :

$$OM = OP' \cos\varphi \quad \text{ou} \quad rI = E_a \cos\varphi,$$

$$I = \frac{E_a \cos\varphi}{r} = \frac{E_a}{\sqrt{r^2 + \left(\omega\mathfrak{L} - \frac{1}{\omega c}\right)^2}},$$

d'où, en divisant les deux membres par $\sqrt{2}$,

$$i_{\text{eff}} = \frac{e_{a\ \text{eff}}}{\sqrt{r^2 + \left(\omega\mathfrak{L} - \frac{1}{\omega c}\right)^2}}.$$

Nous retrouvons donc directement la relation fondamentale établie précédemment.

Grandeurs relatives des diverses forces électromotrices composantes. — Les forces électromotrices de selfinduction et de capacité étant décalées la première de $\frac{\pi}{2}$ en avant sur le courant, l'autre de $\frac{\pi}{2}$ en arrière sont diamétralement opposées et viennent en déduction l'une de l'autre. Elles pourront donc avoir des valeurs plus grandes que la force électromotrice appliquée, puisqu'elles sont fonction de la fréquence.

Exemple. — *Soit un circuit constitué par une bobine ayant une résistance de 500 O et un coefficient de selfinduction de 10 H, mise en série avec un condensateur de 10 microfarads. On applique aux extrémités de l'ensemble une force électro-*

motrice efficace de 1 000 volts sous la fréquence 125. Calculer les forces électromotrices efficaces qui existeront aux bornes de la bobine et du condensateur.

La force électromotrice que l'on trouvera aux bornes de la bobine sera la résultante des forces électromotrices effectives et de selfinduction. Nous allons les calculer successivement.

Le courant traversant le circuit aura une intensité

$$i_{eff} = \frac{1\,000}{\sqrt{\overline{500}^2 + (7\,860 - 127{,}3)^2}} = 0{,}129 \text{ A}.$$

La valeur maximum $I = i_{eff} . \sqrt{2} = 0{,}182$ A.

La force électromotrice effective maximum est $E_e = rI = 91$ volts; elle est en concordance avec le courant.

La force électromotrice maximum de selfinduction est

$$E_s = \omega \mathfrak{L} I = 785 . 10 . 0{,}182 = 1\,430 \text{ volts}.$$

Ces deux forces électromotrices étant décalées à angle droit, leur force électromotrice résultante maximum sera

$$\sqrt{\overline{91}^2 + \overline{1430}^2} = 1\,433 \text{ volts},$$

ce qui correspond à une valeur efficace de 1 016,4 volts que l'on mesurerait, aux bornes de la bobine, au moyen d'un voltmètre. Le décalage en avant de cette force électromotrice sur le courant sera donné par

$$\text{tg}\,\varphi = \frac{\omega \mathfrak{L}}{r} = \frac{7\,850}{500} = 15{,}72,$$

soit un angle φ de 86° 21′.

Aux bornes du condensateur régnera la force électromotrice maximum de

$$E_c = -\frac{I}{\omega c} = -\frac{0{,}182 . 10^5}{785} = -23{,}1 \text{ volts}$$

correspondant à une valeur efficace de 16,4 volts.

On arrive donc à ce résultat paradoxal en apparence, que 1 000 volts étant appliqués aux bornes d'un circuit comprenant une résistance douée de selfinductance, en série avec

une capacité, on trouve aux bornes de la résistance une force électromotrice plus grande que celle appliquée. La disproportion irait en s'accentuant avec la fréquence.

§ 2. — LES ALTERNATEURS.

Le cas d'une spire tournant sur elle-même ne se rencontre que dans les petites machines produisant du courant alternatif ou alternateurs. En général, la spire tout entière est déplacée d'une pièce autour d'un axe de rotation qui lui est extérieur ou, ce qui revient au même, le champ se déplacera devant la spire immobile. On identifiera aisément ces cas avec le premier, en remarquant que tout se passe de la même manière vis-à-vis du flux embrassé. En 1 (fig. 125), le flux est maximum, il est nul en 2, maximum mais de sens inverse dans la position 3, enfin nul en 4.

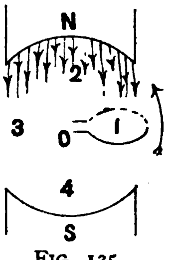


FIG. 125.

On trouverait également que la force électromotrice développée $e = \mathrm{E} \sin \omega t = \mathrm{E} \sin \frac{2\pi}{\mathrm{T}} t$, ω étant la vitesse angulaire de la spire.

Si, au lieu d'une paire de pôles, nous en avons deux de même intensité que précédemment, de A en A′ (fig. 126), la spire passe par les mêmes valeurs de variation de flux et nous aurons une période; de A′ en A une seconde période. La spire possédant la même vitesse angulaire que précédemment, les variations se feront deux fois plus vite, et la force électromotrice induite sera double :

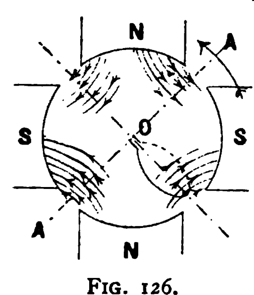


FIG. 126.

$$e' = 2\mathrm{E} \sin \omega' t = \mathrm{E}' \sin \frac{2\pi}{\mathrm{T}'} t = \mathrm{E}' \sin \frac{2\pi}{\frac{\mathrm{T}}{2}} t$$

$$= \mathrm{E}' \sin 2 \cdot \frac{2\pi}{\mathrm{T}} t = \mathrm{E}' \sin 2\omega t.$$

c'est-à-dire qu'à vitesse angulaire égale de la spire, la vitesse angulaire ou pulsation de la force électromotrice est devenue deux fois plus grande : $\omega' = 2\omega$. La fréquence sera doublée.

S'il y a n paires de pôles disposés comme l'indique la figure 125, $\omega'' = n \cdot \frac{2\pi}{T}$, toujours à vitesse angulaire égale de la spire. La fréquence est multipliée par n.

Si, par exemple, une spire ou une série de spires fait 700 tours par minute ou 11,66 tours par seconde et qu'il y ait 6 paires de pôles, la fréquence est de $6 \cdot \frac{700}{60} = 70$; la durée d'une période sera $\frac{1}{70}$ de seconde et la vitesse angulaire de la force électromotrice

$$\omega' = \frac{2\pi}{\frac{1}{70}} = 2\pi \cdot 70 = 439 \text{ radians par seconde.}$$

Nous serons donc dans les mêmes conditions que si les mêmes spires tournaient à la vitesse de 70 tours par seconde, 6 fois plus grande que dans le premier cas, dans un champ homogène unique ayant la même intensité qu'un des champs multiples.

Les machines industrielles sont, en général, destinées à la production de courants de haute tension et de courte période, la fréquence variant de 25 à 133. Il est nécessaire, pour atteindre ces hauts voltages et ce grand nombre d'alternances par seconde, sans arriver à des vitesses de rotation exagérées, de sommer les forces électromotrices induites dans les spires par leur montage en tension et d'employer des machines multipolaires.

Nous trouvons donc, dans tout alternateur, un inducteur engendrant le ou les champs magnétiques nécessaires et un induit coupant ou coupé par ce champ, dont le bobinage sera, comme dans les machines à courant continu, soit à anneau, à tambour ou à disque.

Abstraction faite du genre de bobinage de l'induit, on distingue trois classes d'alternateurs : ceux 1° *à inducteur fixe et induit mobile;* 2° *à inducteur mobile et induit fixe;* 3° *à inducteur et induit fixes ou à enroulements fixes.*

Les diverses bobines induites peuvent être montées, soit en

tension, soit en quantité. La seule précaution à prendre est de n'associer ensemble que des bobines siège de forces électromotrices de mêmes phases, c'est-à-dire semblablement placées par rapport aux noyaux inducteurs de même polarité. Si l'on ne procédait pas ainsi, à certains moments les forces électromotrices des bobines réunies seraient orientées les unes dans un sens, les autres dans l'autre, et viendraient en déduction l'une de l'autre au lieu de s'additionner.

1° **Inducteur fixe et induit mobile.** — PREMIÈRE MACHINE D'INDUCTION DE SIEMENS. — C'est une des machines le plus simples. L'excitation se fait au moyen d'aimants permanents

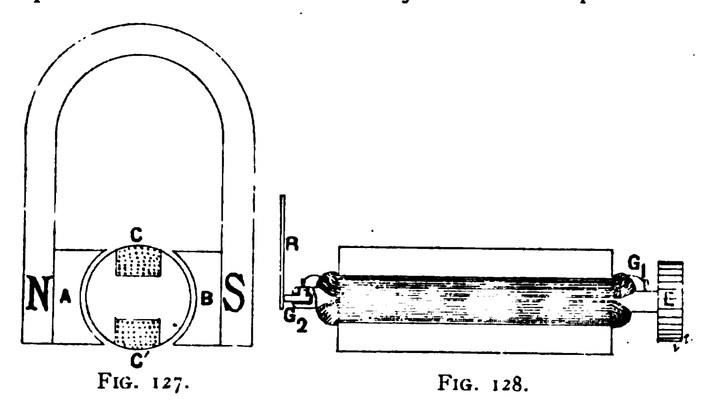


FIG. 127. FIG. 128.

en fer à cheval placés parallèlement, dont les pôles de même nom sont réunis par des armatures en fer doux A et B (fig. 127) rodées cylindriquement dans leurs parties en regard. Entre celles-ci tourne l'induit composé d'un noyau en fer doux, dont la section est en double T. Il se termine par un engrenage E (fig. 128). Dans les évidements diamétraux C, C′, vient s'enrouler du fil isolé dont une extrémité est soudée à une goupille G_1 fixée dans l'axe et l'autre à une goupille G_2 terminant l'axe du côté opposé à l'engrenage, isolée de ce dernier par un manchon en ébonite et sur laquelle vient appuyer une lame ressort R de prise de courant, raccordée à une borne. Le second pôle de la machine est fourni par une borne raccordée à sa partie massive.

Dans la position représentée figure 127, le flux embrassé est maximum, le courant est nul; dans la position à angle droit, le flux embrassé est nul, le nombre de lignes de force coupées est maximum ainsi que la force électromotrice. Nous avons donc une période par tour de la bobine.

Machine Siemens a disque. — Deux séries d'électro-aimants inducteurs N, S (fig. 129), parcourus par des courants permanents, à polarités alternées, sont disposées suivant deux couronnes parallèles. L'intervalle régnant entre les noyaux d'une même couronne est égal à la largeur des pôles. L'induit a ses bobines en nombre égal à celui des paires de pôles inducteurs, enroulées sur un disque tournant dans l'entrefer étroit existant entre les deux couronnes d'électros. Les bobines du disque sont jointives; leur ouverture est égale à la section polaire des inducteurs et leur largeur totale double de la largeur polaire. De cette manière il n'y a aucun espace perdu. Les champs successifs étant alternés, chaque bobine induite est le siège d'une force électromotrice de sens opposé à celle développée dans les bobines adjacentes. Pour que ces forces électromotrices ne soient pas en opposition, il conviendra de renverser les connexions d'une bobine à l'autre, comme l'indique la figure. Les extrémités de l'enroulement induit viennent se terminer à deux bagues en cuivre isolées, sur lesquelles appuient les balais collectant le courant.

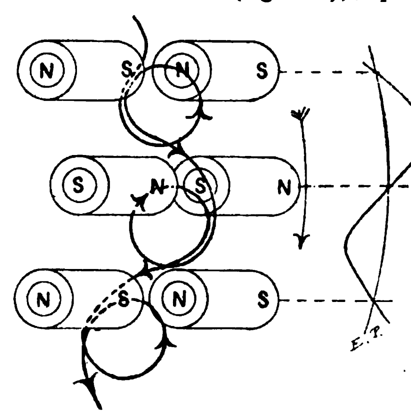


Fig. 129.

Quand les bobines du disque se trouvent en regard des noyaux inducteurs, leurs conducteurs ne coupent plus aucune ligne magnétique, la force électromotrice est nulle; celle-ci est maximum, au contraire, quand les bobines se

trouvent à égale distance des pôles. Puisque le courant change de sens en face de chaque paire de pôles et que les variations sont successivement inverses, les champs ayant des directions contraires, deux pôles consécutifs correspondent à une onde de courant et la période entière comporte l'espace compris entre deux pôles successifs de même nom, sur la circonférence polaire. Le parcours d'une couronne polaire munie de p paires de pôles, correspondra à $\frac{p}{2}$ périodes, et si l'induit fait N tours par seconde, la fréquence sera

$$f = \frac{p}{2} N,$$

d'où pour la durée d'une période

$$T' = \frac{1}{\frac{pN}{2}} = \frac{2}{pN},$$

ce qui correspond à une vitesse angulaire de la force électromotrice

$$\omega = \frac{2\pi}{T'} = \pi p N.$$

Dynamo bipolaire a anneau. — En raccordant à deux bagues isolées sur lesquelles frottent des balais, deux spires diamétralement opposées d'un induit bipolaire à anneau à courant continu, on recueillera aux bagues un courant alternatif dont la force électromotrice maximum est égale à celle E de la dynamo et par conséquent dont la valeur efficace a pour expression $\frac{E}{\sqrt{2}}$.

2° **Inducteur mobile et induit fixe.** — Machine Gramme a anneau. — L'inducteur tournant présente un axe en fer (fig. 130) pourvu de projections radiales chaussées de bobines parcourues par un courant continu donnant aux extrémités des noyaux des polarités successivement inverses. Le courant est amené à l'inducteur par l'intermédiaire de balais frottant sur des bagues isolées, connectées aux extrémités de l'enroulement.

L'induit a la forme d'un anneau enroulé d'un nombre pair de bobines contiguës et entourant l'inducteur.

Supposons les projections polaires symétriquement placées entre les bobines. Celles-ci embrassent alors un flux maximum et la force électromotrice y est nulle. Au contraire, quand les extrémités polaires se trouveront au droit du milieu des bobines (cas de la figure), le nombre de lignes de force coupées sera le plus grand, il en résultera une force électromotrice maximum.

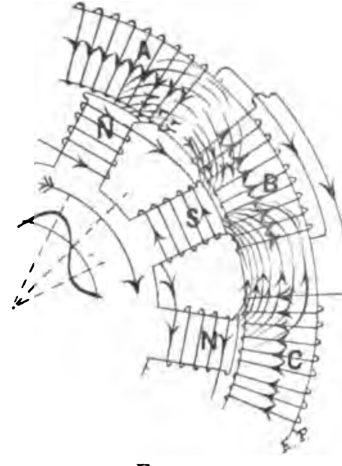


Fig. 130.

Si le nombre de bobines est égal au nombre de pôles, on voit que les conducteurs de A couperont le champ issu de N dans le même sens que ceux de B couperont le champ rentrant dans S. La direction de ces champs étant inverse, les forces électromotrices seront opposées et il conviendra de connecter inversement les bobines successives, ainsi qu'il est représenté sur la figure 130.

L'intervalle compris entre le milieu de deux bobines consécutives correspondra à une onde positive ou négative, de sorte que la formule établie pour l'alternateur. précédent sera applicable.

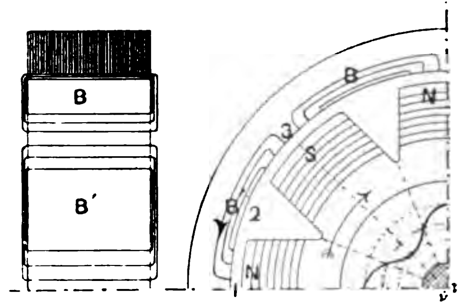


Fig. 131.

Induit en tambour.— La tendance actuelle est d'employer de préférence, comme pour les dynamos, l'enroulement en tambour. L'inducteur présentera les mêmes projections polaires (fig. 131) que dans la machine précédente, mais l'enroulement induit se fait sur la face interne opposée aux extrémités polaires, sous forme

de bobines plates B, B', ... dont les conducteurs sont placés suivant les génératrices intérieures de l'armature et raccordés par des boucles rabattues sur les côtés de celle-ci.

3° **Inducteur et induit fixes ou alternateur à fer tournant.** — MACHINE D'ŒRLIKON. — L'induit comporte une culasse en fonte C dans laquelle viennent s'encastrer deux couronnes A, A, en tôles de fer doux, sur la surface interne desquelles est pratiqué un enroulement en tambour représenté schématiquement (fig. 133). Entre les deux couronnes, s'enroule une bobine inductrice unique B. Enfin, à l'intérieur de l'induit tourne l'inducteur constitué par une masse en fer doublement dentée I dont les dents viennent successivement compléter le circuit magnétique de chaque paire de bobines situées en face l'une de l'autre dans les deux enroulements, d'où résultent des variations de flux engendrant un courant alternatif dans chacune des moitiés de l'induit. On groupe ces deux circuits soit en tension, soit en dérivation.

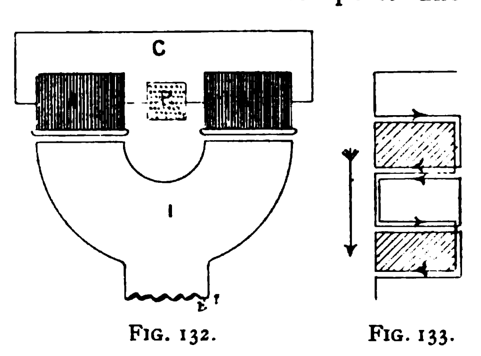
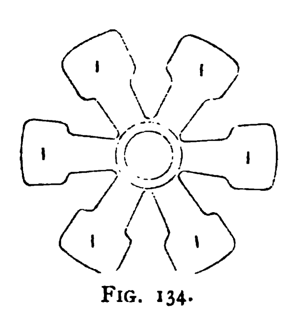


FIG. 132. FIG. 133.


FIG. 134.

Comparaison des trois systèmes. — On ne rencontre plus le premier système que dans les machines de faible ou moyenne puissance. Si dans ces dernières il a l'avantage de restreindre les parties siège d'hystérésis et de courants de Foucault (machines à disque), il présente par contre l'inconvénient d'avoir ses parties mobiles, les plus difficiles à bien isoler, traversées par le courant à haute tension.

Dans le troisième système, qui est le plus récent, l'aimanta-

tion du fer de l'induit n'étant pas renversée, les variations du flux acquièrent une importance relative moindre, qu'affaiblit encore le magnétisme rémanent. Pour une même puissance, ces machines sont donc beaucoup plus volumineuses que les autres, leur rendement est moindre et la chute de tension dans l'induit plus grande.

C'est le second système, mais avec l'enroulement en tambour, qui prévaut et se répand de plus en plus. Il a l'avantage d'être robuste et bien mécanique. Les noyaux polaires des inducteurs comportent des tôles assemblées et ajustées par boulons à la périphérie d'un anneau en acier coulé fermant les divers circuits inducteurs, dont les enroulements sont généralement constitués au moyen d'un ruban en cuivre de large surface, isolé, bobiné à plat, pressé et maintenu solidement en place. Les bobines, montées en série, s'alimentent de courant continu par l'intermédiaire de balais en charbon et d'anneaux collecteurs montés sur l'arbre.

Dans la carcasse en fonte de l'induit viennent s'assembler en queue d'aronde les diverses tôles. Des intervalles vides sont ménagés de distance en distance pour faciliter la ventilation, que le mouvement même de l'inducteur assure d'une manière complète. Sur la périphérie intérieure des tôles, des encoches spéciales permettent la fixation des bobines induites, maintenues au moyen de coins donnant à l'ensemble une parfaite solidité. Enfin, la visite de l'induit est facilitée par son montage sur des glissières, qui permettent de l'écarter complètement des inducteurs, par un déplacement parallèle à l'arbre.

Excitation des inducteurs. — Dans les très petites machines, nous rencontrons des aimants permanents. Parfois on utilise, à l'aide d'un commutateur circulaire sur lequel frottent des balais, une dérivation du courant alternatif principal; mais en général, l'excitation se fait par courant continu au moyen d'une petite dynamo dite *excitatrice,* le plus souvent calée à l'extrémité de l'axe de l'alternateur opposée à la poulie de commande.

Réaction d'induit. — La réaction d'induit d'un alternateur, c'est-à-dire la modification qu'exerce sur le champ inducteur le courant qui traverse l'induit, est fonction de l'intensité du courant, de son décalage et naturellement aussi de la forme et de la constitution de l'alternateur. Considérons par exemple la machine figure 131, et supposons que le courant soit en concordance de phase avec la force électromotrice.

Dans la position figurée, où le premier noyau N est en face de 1, le courant dans la bobine B′ a le sens de la flèche. Il envoie un flux directement opposé au flux inducteur, et cet effet perdure jusqu'à ce qu'il soit éteint, ce qui arrive quand le milieu de N est en face de 2. A partir de ce moment, le courant change de sens, et son flux concorde avec le flux inducteur jusqu'en 3 et ainsi de suite. Les mêmes effets se produisent dans toutes les bobines. Donc, *quand le courant est en concordance avec la force électromotrice, la réaction d'induit est nulle.*

Supposons maintenant le courant en retard sur la force électromotrice. Dans ce cas, la force électromotrice induite sera annulée (position 2), alors que le courant aura encore le sens de la flèche. Par conséquent, il enverra pendant plus longtemps qu'avant un flux opposé au flux inducteur, et la force électromotrice engendrée dans l'induit se trouvera réduite. Si l'alternateur dessert un circuit inductif, il sera donc nécessaire, pour compenser la réaction d'induit, d'enrouler sur l'inducteur un nombre d'ampères-tours supplémentaires $m = Ki_{eff}\,\varphi$.

Si, au contraire, le courant est décalé en avant, l'inverse se produit et la réaction d'induit a pour effet de renforcer le voltage développé par la machine.

§ 3. — COUPLAGE ET RENDEMENT DES ALTERNATEURS.

On ne peut évidemment coupler que des alternateurs de même fréquence, puisque avec des fréquences différentes, les forces électromotrices se trouveraient périodiquement en opposition.

Couplage en série. — Le couplage en série n'est réalisable que si les machines sont réunies rigidement.

Soient, en effet, deux alternateurs montés en série, entraînés par des intermédiaires élastiques comme des courroies, ou par des moteurs indépendants; $e_1 = E \sin \omega t$, $e_2 = E \sin (\omega t - \varepsilon)$ les forces électromotrices qu'ils développent, $\frac{\varepsilon}{\omega}$ étant le retard en temps du second alternateur sur le premier; r la résistance totale du circuit et φ le décalage en *arrière* du courant.

La force électromotrice totale sera à l'instant t :

$$e_1 + e_2 = 2E \sin \left(\omega t - \frac{\varepsilon}{2}\right) \cos \frac{\varepsilon}{2}$$

et le courant

$$i = \frac{2E \cos \frac{\varepsilon}{2} \cos \varphi}{r} \sin\left(\omega t - \frac{\varepsilon}{2} - \varphi\right),$$

ce qui donne pour la valeur efficace

$$i_{eff} = \frac{\sqrt{2}\, E \cos \frac{\varepsilon}{2} \cos \varphi}{r}.$$

Nous allons calculer quelle est la puissance développée par nos deux appareils. Le décalage du courant

$$I \sin\left(\omega t - \frac{\varepsilon}{2} - \varphi\right)$$

sur la force électromotrice $E \sin \omega t$ du premier est

$$\omega t - \left(\omega t - \frac{\varepsilon}{2} - \varphi\right) = \frac{\varepsilon}{2} + \varphi.$$

La puissance produite par le premier alternateur ressort donc à

$$P_1 = e_{eff} \cdot i_{eff} \cdot \cos\left(\frac{\varepsilon}{2} + \varphi\right) = K \cos \frac{\varepsilon}{2} \cos \left(\frac{\varepsilon}{2} + \varphi\right).$$

Le décalage du courant sur la force électromotrice développée par le second alternateur sera de même :

$$\omega t - \varepsilon - \left(\omega t - \frac{\varepsilon}{2} - \varphi\right) = -\frac{\varepsilon}{2} + \varphi,$$

ce qui donne pour sa puissance

$$P_2 = e_{\text{eff}} \cdot i_{\text{eff}} \cdot \cos\left(-\frac{\varepsilon}{2} + \varphi\right) = K \cos\frac{\varepsilon}{2} \cos\left(-\frac{\varepsilon}{2} + \varphi\right);$$

de sorte que

$$P_2 - P_1 = K \cos\frac{\varepsilon}{2}\left[\cos\left(-\frac{\varepsilon}{2} + \varphi\right) - \cos\left(\frac{\varepsilon}{2} + \varphi\right)\right]$$

$$= K \sin\varepsilon \sin\varphi,$$

quantité positive pour toutes les valeurs de $\varepsilon < \pi$, φ étant positif par hypothèse.

Nous voyons que dès qu'un alternateur retarde, la conséquence de ce retard est de lui faire développer plus d'énergie électrique. Il absorbe par conséquent plus d'énergie mécanique et retardera davantage en glissant sur sa courroie. Cette tendance persistera jusqu'à ce que $\varepsilon = \pi$, puisque alors les alternateurs produiront la même énergie, d'ailleurs nulle, le courant lui-même étant nul. Dès que $\varepsilon > \pi$, l'excès devient négatif ; le second alternateur développe moins d'énergie électrique que l'autre ; il absorbe conséquemment moins d'énergie mécanique et revient au synchronisme. La stabilité serait assurée, mais la puissance est nulle.

INFLUENCE D'UN DÉCALAGE EN AVANT. — Il est à remarquer qu'avec le courant décalé en avant, c'est-à-dire φ négatif, la marche en série ne présenterait aucune difficulté, puisque l'excès $P_2 - P_1$ devenant négatif, l'alternateur en arrière rattraperait son retard. Mais ce cas ne se rencontre pour ainsi dire jamais en pratique.

Couplage en parallèle. — Au contraire, la marche en parallèle d'alternateurs identiques, tournant à la même vitesse et

dont les forces électromotrices sont concordantes, est stable. Au moment du couplage, il faut que les forces électromotrices soient en phase. On s'en assure au moyen de l'indicateur de phase qui consiste essentiellement en deux dérivations AB, CD (fig. 135) contenant des lampes, placées chacune entre les pôles de même nom des deux machines à réunir. Lorsque les phases coïncident, A et B, de même que C et D, sont à chaque instant au même potentiel et les lampes restent éteintes. Elles s'allument, au contraire, s'il y a opposition de phase.

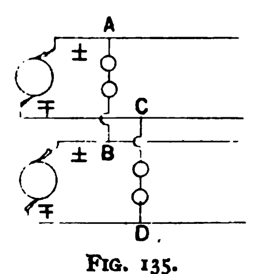


Fig. 135.

Rendements. — Le tableau suivant (*) donne les renseignements les plus intéressants relatifs à des alternateurs de diverses puissances :

Puissance absorbée en poncelets, y compris l'excitation.	Vitesse en tours par minute.	Rendement industriel		Poids total en tonnes avec excitatrice.	Dépense à vide et excitation normale en kw.	Dépense par effet Joule dans l'induit, charge normale kw.
		pleine charge.	demi-charge.			
19	1 000	0,87	0,82	2,15	2	0,45
31	750	0,88	0,83	2,5	2,9	0,93
42	»	0,90	0,85	3,45	4,7	1,06
65	600	0,91	0,87	4,5	4,6	1,57
90	500	0,92	»	6,2	5,9	1,48
120	»	»	»	8,3	7,4	1,94
158	»	0,925	»	8,9	8,5	3,1
225	375	0,93	0,88	14,5	13,7	4

(*) Hospitalier, *Formulaire*, 1901, p. 242.

CHAPITRE XI

COURANTS POLYPHASÉS

§ 1. — GÉNÉRALITÉS (*).

Lorsqu'un barreau 1 (fig. 136), de longueur l, tourne autour d'un axe O situé à une distance r, dans un champ magnétique uniforme de $\mathcal{H}$ unités CGS dont la direction lui est perpendiculaire, avec une vitesse angulaire constante de ω radians par seconde, il est le siège, en vertu de la règle de Faraday, d'une force électromotrice égale à chaque instant au nombre de lignes de force coupées par seconde. Comptons les temps, à partir du moment où le barreau a passé en a, sur la verticale de l'axe et décomposons l'intensité du champ, au point où se trouve le barreau, en deux composantes rectangulaires dirigées l'une $\mathcal{H}' = \mathcal{H} \sin \omega t$ suivant le rayon, l'autre $\mathcal{H}'' = \mathcal{H} \cos \omega t$ perpendiculairement à celui-ci. Cette dernière, étant constamment tangente à la trajectoire décrite par le barreau, n'aura aucune de ses lignes de force coupée par celui-ci; celles de l'autre, au contraire, seront intégralement coupées par le barreau, de sorte que la force électro-

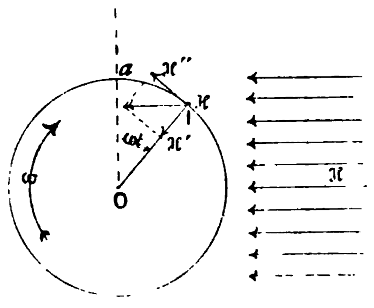


Fig. 136.

(*) Nous avons mis à contribution, pour la rédaction de ce paragraphe et du chapitre suivant, un excellent travail de notre collègue Colard, *Notions générales sur les courants alternatifs*. (Bulletin de la Société belge d'Électriciens, t. XIV de 1897.)

motrice développée à l'instant t et dirigée de l'avant vers l'arrière possède la valeur

$$e_1 = \omega r l \mathcal{H} \sin \omega t.$$

Si nous avons n barreaux régulièrement distribués sur la circonférence décrite, et situés par conséquent à la distance angulaire $\frac{2\pi}{n}$ l'un de l'autre, lorsque le barreau 1 occupe la position représentée à ωt radians de l'axe Oa, les autres barreaux se trouvent aux distances angulaires respectives du premier

$$\omega t - \frac{2\pi}{n}, \quad \omega t - 2 \, . \frac{2\pi}{n}, \quad \ldots$$

En vertu de la formule écrite ci-dessus, il s'y développera au même moment t les forces électromotrices :

$$e_2 = \omega r l \mathcal{H} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{n}\right).$$

$$e_3 = \omega r l \mathcal{H} \sin \left(\omega t - 2 \, . \frac{2\pi}{n}\right),$$

. . . .

. . . .

de fréquence $\frac{\omega}{2\pi}$, décalées l'une par rapport à l'autre de l'angle $\frac{2\pi}{n}$.

L'ensemble de ces forces électromotrices constitue ce que l'on appelle un système polyphasé complet de forces électromotrices alternatives.

Remarquons que l'oscillation de ces diverses forces électromotrices commence au moment où leur barreau traverse la verticale Oa, leurs passages successifs par zéro se faisant au bout de temps $\frac{2\pi}{n\omega}$ seconde.

En réunissant séparément les barreaux à des circuits semblables séparés, ceux-ci deviendront le siège de courants alternatifs de même amplitude, tous décalés d'un même angle φ par rapport à leurs forces électromotrices, donc décalés entre eux de la même quantité $\frac{2\pi}{n}$. *Ils formeront aussi un système polyphasé complet de courants alternatifs.*

Propriété fondamentale des systèmes polyphasés. — *La somme des* n *quantités constituant un système polyphasé complet est nulle à chaque instant.*

Soit, en effet, le système :

$$k \sin \omega t, \quad k \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{n}\right), \quad \ldots, \quad k \sin\left(\omega t + p\frac{2\pi}{n}\right) \quad \ldots$$

On aura :

$$k \sum_{p=0}^{p=n-1} \sin\left(\omega t + p \cdot \frac{2\pi}{n}\right) = k \cdot 0 = 0.$$

Considérons un polygone plan régulier étoilé ou non ABC... de n côtés et deux axes rectangulaires situés dans son plan. Si α (fig. 137) désigne l'angle que fait un des côtés du polygone, choisi arbitrairement, avec le premier axe, le côté suivant fera avec ce même axe l'angle α plus l'angle extérieur du polygone au sommet B formé par ces deux côtés; pour le côté suivant, on aura (en C) α plus deux fois l'angle extérieur et ainsi de suite. En décrivant successivement ces angles extérieurs qui s'additionnent, on vérifiera aisément que, lorsqu'on est revenu au côté de départ AB, on a décrit autant de fois 2π que l'on aura fait de tours complets autour du polygone, soit $q \cdot 2\pi$ si q est ce nombre de tours. Puisqu'il y a n angles extérieurs, chacun d'eux vaut $\frac{q \cdot 2\pi}{n}$, et les angles faits par les côtés successifs avec l'axe considéré seront

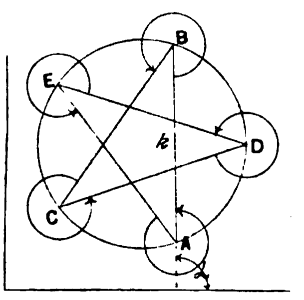


Fig. 137.

$$\alpha, \ \alpha + q \cdot \frac{2\pi}{n}, \qquad \alpha + 2 \cdot q\frac{2\pi}{n}, \ \ldots$$

Le polygone étant fermé par hypothèse, la somme des projections de ses côtés k sur chacun des deux axes est nulle.

On a donc

$$k\sum_{p=0}^{p=n-1} \sin\left(\alpha + pq\frac{2\pi}{n}\right) = 0 \quad \text{et} \quad k\sum_{p=0}^{p=n-1} \cos\left(\alpha + pq\frac{\pi 2}{n}\right) = 0.$$

Ces relations sont vraies quelle que soit la valeur entière assignée à q. Si $q = 1$, la première nous donne précisément la formule qu'il fallait démontrer.

Ainsi, si l'on fait aboutir, en un même point, n courants polyphasés, la somme de ces courants est nulle à tout instant ; il n'est pas nécessaire de leur ménager un exutoire à partir de ce point.

Divers modes de montage. — MONTAGE EN ÉTOILE. — Au lieu de réunir chacun des barreaux ou bobines à des circuits distincts, ce qui exige $2n$ fils de connexion ou de ligne, on

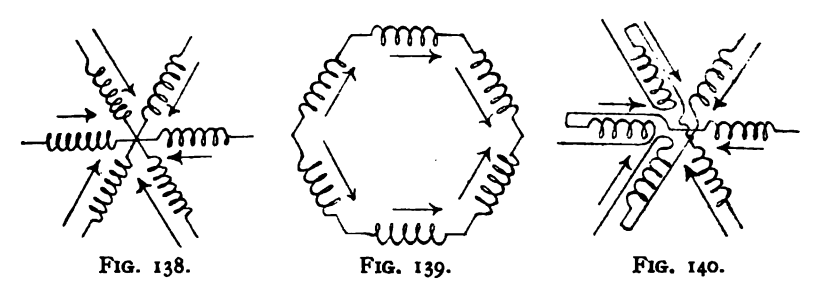


FIG. 138. FIG. 139. FIG. 140.

peut raccorder ensemble toutes les entrées des barreaux (fig. 138). Les sorties seront mises en rapport avec les circuits d'utilisation au moyen de n fils de ligne seulement. *C'est le montage en étoile.*

MONTAGE EN POLYGONE. — Puisque la somme des forces électromotrices développées à chaque instant est nulle, on pourra raccorder la sortie d'un barreau à l'entrée du suivant et ainsi de suite (fig. 139), sans qu'il y ait production d'aucune force électromotrice résultante dans la chaîne ainsi formée. *C'est le montage en polygone.* Les circuits d'utilisation sont dérivés, par n fils de ligne, sur les sommets du polygone, entre lesquels règne la différence de potentiel engendrée dans les bobines qui y aboutissent.

On remarquera que rien n'empêche de raccorder à des générateurs montés en étoiles, des récepteurs montés en polygone ou vice versa. La seule condition à remplir est d'avoir une symétrie complète de part et d'autre.

SYSTÈME SEMI-POLYPHASÉ. — Lorsque deux barreaux ou bobines sont décalés de π radians, les forces électromotrices qui s'y trouvent développées $e = \text{E} \sin \omega t$ et $e' = \text{E} \sin (\omega t \pm \pi) = - \text{E} \sin \omega t = - e$, sont à chaque instant égales et opposées. On pourra donc réunir en série ces deux bobines, en raccordant la sortie de l'une à l'entrée de l'autre (fig. 140), et disposer ainsi d'une force électromotrice double. Si toutes les bobines ont leur correspondante diamétralement opposée, en d'autres termes, si n est pair, on obtiendra de cette manière $\frac{n}{2}$ sections distinctes, régulièrement distribuées sur la circonférence et à la distance angulaire $\frac{2\pi}{n}$. *On formera ainsi un système semi-polyphasé,* qui ne jouira plus de la propriété fondamentale de la nullité de la somme des quantités analogues à un instant quelconque. Il ne sera conséquemment plus possible d'adopter le montage en étoile, puisque les courants dans les divers circuits n'ont plus une somme nulle; ni le montage en polygone, puisque les $\frac{n}{2}$ forces électromotrices n'ont pas une résultante nulle. Toutefois, pour réunir les extrémités des bobines aux appareils d'utilisation, il suffira de n fils de connexion qui pourront même être réduits à $\frac{n}{2} + 1$, en réunissant ensemble $\frac{n}{2}$ fils de retour.

§ 2. — LES ALTERNATEURS POLYPHASÉS.

En pratique, on recourt généralement aux machines multipolaires, afin de ne pas devoir exagérer la vitesse angulaire. On monte en tension les sections ayant la même situation par rapport aux pôles de mêmes noms de l'inducteur, de manière que leurs forces électromotrices s'additionnent. Les alternateurs polyphasés ne diffèrent de l'alternateur ordinaire qu'en ce qu'au lieu d'un seul circuit induit, on en trouve plusieurs décalés l'un par rapport à l'autre d'une

certaine quantité variant avec la nature des courants que l'on veut obtenir.

Nous avons vu précédemment que le couple résistant d'un alternateur, débitant un courant décalé de φ sur sa force électromotrice, devient moteur deux fois par période, pendant un temps $\frac{\varphi}{\omega}$ secondes, d'où résulte une grande variation de son couple résistant. Cet effet perturbateur sera atténué dans les génératrices polyphasées et d'autant plus que le nombre de phases est plus grand, puisque le couple moteur momentané d'une phase se superpose à $n - 1$ couples résistants. Les variations seront donc moindres et l'entraînement de la génératrice par un moteur mécanique présentera moins de difficulté.

On ne rencontre guère jusqu'ici, dans l'industrie, que deux espèces d'alternateurs polyphasés produisant les courants bi- et triphasés, les seconds admettant deux variantes suivant que le montage est en étoile ou en polygone. Quelques machines hexaphasées sont cependant en fonctionnement en Amérique.

Alternateur di- ou biphasé. — Il produit deux courants décalés l'un par rapport à l'autre d'un quart de période (fig. 141).

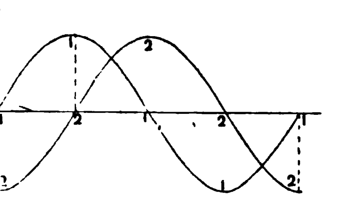


FIG. 141.

En appelant e_{eff}, i_{eff} la force électromotrice et l'intensité efficaces de chacun d'eux et φ le décalage des courants sur les forces électromotrices, la puissance de la machine sera $P = 2e_{eff}\, i_{eff} \cos \varphi$.

Comme construction, c'est un alternateur ordinaire présentant deux séries de bobines induites 1 et 2 (fig. 142) symétriquement distribuées sur la couronne intérieure de l'induit. Dans la position figurée, la force électromotrice est nulle dans l'enroulement 1 et maximum dans l'enroulement 2.

Les extrémités de chacun des enroulements induits se raccordent à deux bornes où se font les raccordements des circuits d'utilisation.

Si un seul fil de retour est utilisé, deux des bornes soit d'entrée, soit de sortie, sont métalliquement réunies entre elles, constituant la troisième borne de la machine.

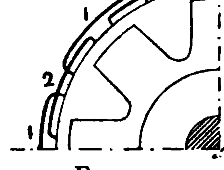


Fig. 142.

De la formule écrite ci-dessus, on conclut qu'à égalité d'encombrement, la machine diphasée aura une puissance double de la machine alternative ordinaire développant les mêmes valeurs efficaces, ce qui, indépendamment d'autres éléments de supériorité que nous étudierons plus loin, constitue un avantage marqué sur la seconde.

Alternateur triphasé. — Nous rencontrons ici trois courants décalés d'un tiers de période (fig. 143). Comme différence de construction, nous trouvons (fig. 144) trois groupes

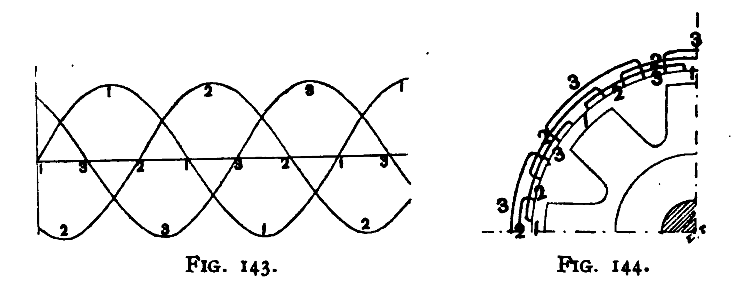


Fig. 143. Fig. 144.

égaux de bobines induites décalés l'un par rapport à l'autre du tiers de la longueur périphérique correspondant à une période, c'est-à-dire du tiers de l'intervalle séparant la distance de deux pôles consécutifs de même nom de l'inducteur.

Montage en étoile. — Si les entrées des trois circuits sont réunies entre elles, nous obtenons le montage en étoile, la borne commune étant le *point neutre*.

Nous allons déterminer quelle sera l'expression de la puissance en fonction de la force électromotrice efficace existant entre les trois bornes de la machine. Soit OA

(fig. 145) le vecteur représentant la force électromotrice efficace u_{eff} développée dans une des branches de l'étoile.

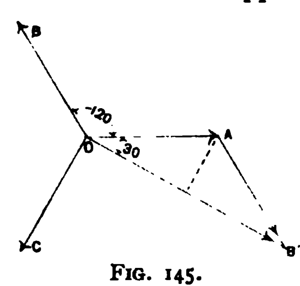


Fig. 145.

Les forces électromotrices efficaces des deux autres branches sont représentées par le même vecteur ayant tourné respectivement de 120° et 240°, soient OB et OC (remarque III, p. 206). La différence de potentiel ou tension composée e_{eff} existant entre les bornes extérieures A et B sera obtenue en soustrayant le vecteur OB du vecteur OA. Nous porterons donc à l'extrémité de OA un vecteur égal, parallèle et de sens contraire à OB, et nous joindrons au point O. Le vecteur résultant

$$e_{eff} = OB' = 2\,OA \cos 30° = \frac{2u_{eff}\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}\,.\,u_{eff}.$$

Mais en appelant i_{eff} l'intensité efficace du courant circulant dans les trois branches de l'étoile, la puissance de la machine est

$$3u_{eff}i_{eff} = \frac{3e_{eff}i_{eff}}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}\,e_{eff}i_{eff} = 1{,}73\,e_{eff}i_{eff}.$$

Telle est l'expression de la puissance. Si les courants sont décalés d'un angle φ sur les forces électromotrices, on aura

$$P = 1{,}73\,e_{eff}i_{eff}\cos\varphi.$$

Montage en polygone. — Quand les trois groupes de bobines sont raccordés en polygone, c'est-à-dire l'entrée de l'un à la sortie de l'autre et ainsi de suite, les bornes de la machine étant dérivées sur les points de jonction, la force électromotrice existant entre deux bornes quelconques sera celle développée dans le groupe de bobines considérées, mais les courants passant dans les fils de ligne auront pour valeur la différence entre les courants produits dans les bobines consécutives, de sorte que la construction de la figure 145

sera encore applicable, les trois vecteurs représentant alors les courants efficaces développés dans chaque groupe de bobines et le vecteur résultant le courant sortant par les bornes. On obtiendra donc, pour la puissance, la même formule que précédemment.

Raison de la préférence donnée au montage en étoile. — C'est le montage en étoile qui est le plus usité, parce que pour une même différence de potentiel e_{eff} entre les bornes de la machine, il n'exige entre les extrémités d'un groupe de bobines qu'une tension

$$u_{eff} = \frac{e_{eff}}{\sqrt{3}} = 0,578\, e_{eff}.$$

Les enroulements en polygone, au contraire, doivent être établis pour la tension totale e_{eff}.

L'induit bipolaire à anneau comme alternateur triphasé. — En raccordant trois sections d'un induit bipolaire à anneau situées à 120° l'une de l'autre, à trois bagues isolées sur lesquelles frottent des balais, on pourra recueillir des courants triphasés à ces bagues. Les trois sections de l'anneau sont montées en polygone.

Traçons une circonférence représentant l'enroulement de l'induit; soient A, B, C les points de jonction aux bagues triphasées, D le point diamétralement opposé au sommet A. Quand AD se trouve sur la ligne des balais, il règne entre A et D la différence de potentiel maximum E de la dynamo. La tension entre A et D est la résultante de toutes les tensions développées dans les spires successives comprises entre A et D, de même que de celles engendrées dans tous les groupes entre lesquels on peut subdiviser chaque demi-anneau. En

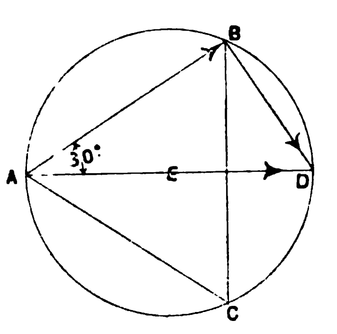


Fig. 146.

particulier AD sera la résultante des tensions régnant dans les enroulements AB et BD. Or le triangle ABD étant rectangle, on a

$$AB = AD \cos 30^\circ = \frac{AD\sqrt{3}}{2}.$$

La valeur maximum de la force électromotrice engendrée dans un des enroulements triphasés est donc $\frac{E\sqrt{3}}{2}$ et la valeur efficace

$$e_{eff} = \frac{E\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} = 0{,}614\ E.$$

CHAPITRE XII

LES ALTERNOMOTEURS

On distingue deux grandes classes de moteurs à courants alternatifs : les moteurs synchrones et les moteurs asynchrones.

Les premiers, qui exigent une excitation par courant continu et ne démarrent pas en charge, ne fournissent du travail mécanique qu'à une vitesse angulaire déterminée. Par contre, leur facteur de puissance à pleine charge est élevé.

Les seconds fournissent du travail à des vitesses variant entre de larges limites : ils démarrent sous charge en polyphasé et n'exigent pas de courant continu, mais leur facteur de puissance à pleine charge est plus faible. Malgré ce dernier inconvénient, ils restent bien supérieurs aux premiers pour la plupart des applications. Ils sont même comparables aux moteurs à courant continu, sur lesquels ils présentent l'avantage d'être dépourvus de collecteur. Dans certains types, on ne rencontre aucun contact glissant, ce qui supprime les étincelles, qualité essentielle au point de vue de l'emploi dans les charbonnages notamment.

§ 1. — MOTEURS SYNCHRONES.

Moteur synchrone monophasé. — L'alternateur ordinaire peut fonctionner comme moteur, quand on envoie dans son circuit induit un courant alternatif. Il constitue ainsi un appareil réversible.

Soit un alternateur tournant avec une vitesse angulaire déterminée ω_1, donnant une force électromotrice alternative

$$e = E \sin \omega t = E \sin 2\pi f t$$

et traversé par un courant quelconque de vitesse angulaire ω' et décalée de φ par rapport à e au moment considéré. Le décalage φ varie ici continuellement, les deux fonctions n'ayant pas même période. On a donc au moment t

$$i = \mathrm{I}\sin(\omega' t - \varphi) = \mathrm{I}\sin(2\pi f' t - \varphi).$$

La puissance électrique produite par l'alternateur sera à chaque instant

$$\mathrm{P} = ei = \mathrm{EI}\sin 2\pi f t \sin(2\pi f' t - \varphi)$$
$$= \frac{\mathrm{EI}}{2}\left\{\cos[2\pi(f - f')t + \varphi] - \cos[2\pi(f + f')t - \varphi]\right\}.$$

Ou en posant $f - f' = f''$, $f + f' = f'''$

$$\mathrm{P} = \frac{\mathrm{EI}}{2}\left\{\cos(2\pi f'' t + \varphi) - \cos(2\pi f''' t - \varphi)\right\}.$$

La différence de deux fonctions périodiques alternatives étant elle-même nécessairement périodique et alternative, comme le démontrerait d'ailleurs la composition vectorielle des deux cosinusoïdes dont il s'agit, l'alternateur sera le siège d'une puissance alternativement positive, puis négative, c'est-à-dire subira une série d'impulsions dans un sens immédiatement suivies de la même série d'impulsions égales et contraires, de sorte que la puissance moyenne qu'il développe est nulle.

Il existe cependant deux cas particuliers où il n'en sera pas ainsi : c'est quand le terme périodique d'un des deux cosinus est nul.

1° $f'' = 0$ ou $f = f'$ ou encore $\omega = \omega'$. Le courant traversant l'alternateur est de mêmes fréquence et signe que la force électromotrice engendrée par celui-ci.

On a alors $e = \mathrm{E}\sin\omega t$; $i = \mathrm{I}\sin(\omega t - \varphi)$, et pour la puissance moyenne, d'après ce que nous savons (courant décalé de φ sur sa force électromotrice),

$$\mathrm{P} = \frac{\mathrm{EI}}{2}\cos\varphi.$$

Si cos φ est positif, la machine fournira une certaine puissance électrique, en absorbant naturellement une puissance mécanique équivalente ; nous sommes dans le cas du générateur.

2° $f''' = 0$ ou $f' = -f$ ou encore $\omega' = -\omega$, le courant est encore de même fréquence que la force électromotrice, mais il a changé de sens. On a

$$e = E \sin \omega t, \quad i = I \sin(-\omega t - \varphi) = -I \sin(\omega t + \varphi)$$

et

$$P = -\frac{EI}{2} \cos \varphi.$$

Si cos φ est positif, l'alternateur fournira une puissance électrique négative, c'est-à-dire qu'il absorbera de la puissance électrique venant du circuit extérieur et restituera une puissance mécanique équivalente, en vertu de la loi de la conservation de l'énergie.

On conclut des considérations précédentes qu'un alternateur tournant comme moteur ne peut produire de la puissance mécanique, qu'à la condition d'être animé d'une vitesse angulaire mécanique ω_1, telle que la force électromotrice qu'il produit soit de même fréquence que le courant qu'on lui fournit. *C'est cette vitesse spéciale que l'on appelle vitesse de synchronisme.*

Cette vitesse angulaire de l'induit est fonction du nombre p des pôles inducteurs et de la fréquence f des courants qui le traversent. En effet

$$\omega = 2\pi f = \frac{p}{2} \omega_1$$

et l'on voit que *la vitesse mécanique angulaire de synchronisme ω_1 de l'induit est proportionnelle à la fréquence* f *des courants d'alimentation et inversement proportionnelle au nombre des pôles du moteur.*

Pour une fréquence donnée des courants d'alimentation, on pourra donc réduire à volonté la vitesse de rotation du récepteur, en multipliant convenablement le nombre de pôles.

Remarquons que la force électromotrice produite par la machine, orientée en sens inverse du courant, est en somme une force contre-électromotrice, opposée à la force électromotrice de la source extérieure fournissant l'énergie.

C étant le couple mécanique produit, on aura

$$\frac{EI \cos \varphi}{2} = \omega_1 C \quad \text{d'où} \quad C = \frac{1}{\omega_1} \frac{EI}{2} \cos \varphi.$$

En négligeant la réaction d'induit, E ne dépendra que de la vitesse, puisque l'excitation est indépendante.

a) Alimentation sous courant efficace constant. — Alors I et ω' sont constants. La dernière condition entraîne la constance de ω ainsi que de la vitesse angulaire mécanique ω_1, puisque celle-ci est, comme nous l'avons vu, proportionnelle à la première; E devient donc aussi constant, l'excitation étant indépendante et la réaction d'induit supposée négligeable. Dans l'équation

$$C = \frac{1}{\omega_1} \frac{EI}{2} \cos \varphi,$$

E, ω_1 et I sont constants et toute variation du couple résistant ne peut dès lors se traduire que par une variation du facteur de puissance cos φ, c'est-à-dire du décalage du courant.

A vide, C étant nul, le décalage est égal à $\frac{\pi}{2}$; puis à mesure que C augmente, le décalage diminue. Il devient nul quand le couple atteint sa valeur maximum

$$\frac{1}{\omega_1} \frac{EI}{2}.$$

Dès que le couple résistant dépasse ce maximum, le couple moteur ne peut le vaincre, et l'alternomoteur, incapable de tourner à la vitesse du synchronisme, reste en retard. Le synchronisme n'existant plus, sa puissance moyenne devient subitement nulle, il s'arrête. Suivant l'expression consacrée, il est *tombé hors de phase* ou s'est *décroché*.

b) Alimentation sous force électromotrice efficace constante. — Supposons maintenant l'alternomoteur branché

sur un circuit à force électromotrice $e = E_1 \sin(\omega t - \beta)$, dans laquelle E_1 et par suite la force électromotrice efficace est constante. Nous aurons encore

$$C = \frac{1}{\omega_1} \frac{EI}{2} \cos\varphi, \qquad (1)$$

relation dans laquelle nous devrons remplacer $I \cos\varphi$ en fonction de la force électromotrice extérieure, donnée de la question, pour pouvoir la discuter. Nous allons d'ailleurs voir de suite pourquoi nous avons choisi la force électromotrice appliquée décalée en arrière sur celle développée par l'alternomoteur.

On aura, si r est la résistance de l'alternateur,

$$\frac{E_1 \sin(\omega t - \beta) - E \sin \omega t}{r} = I \sin(\omega t - \varphi),$$

d'où, en développant et identifiant,

$$I \cos\varphi = \frac{E_1 \cos\beta - E}{r}$$

et, en remplaçant dans (1),

$$C = \frac{1}{\omega_1} \frac{E(E_1 \cos\beta - E)}{2r}.$$

Cette formule montre clairement la nécessité du décalage en arrière de la force électromotrice appliquée, ou, ce qui revient au même, du décalage en avant de la force électromotrice induite. En effet, si la charge augmente, le moteur ralentit, β diminue et le couple augmente. C'est donc par raison de stabilité de fonctionnement, qu'il faut supposer la force électromotrice du moteur décalée en avant et non en arrière.

A vide

$$C = 0 \quad \text{et} \quad \cos\beta = \frac{E}{E_1},$$

puis à mesure que C augmente, β diminue, c'est-à-dire que l'avance de la force contre-électromotrice de l'alternateur sur

la force électromotrice extérieure diminue. Le couple est maximum et égal à

$$\frac{1}{\omega_1}\frac{E(E_1 - E)}{2r} \text{ pour } \beta = 0,$$

c'est-à-dire quand il y a concordance de la force électromotrice du moteur et de la force électromotrice extérieure. Dès que le couple résistant dépasse cette valeur maximum, le couple moteur est incapable de le vaincre, *l'alternomoteur se décroche et s'arrête.*

MISE EN MARCHE. — Puisque la puissance mécanique moyenne du moteur est nulle à toute autre vitesse que celle du synchronisme, il en résulte qu'il est nécessaire de lui faire atteindre cette vitesse par un moyen quelconque. Dès que la marche synchronique est obtenue, il peut prendre sa charge.

INDIFFÉRENCE DU SENS DE ROTATION. — Le moteur tourne dans les deux sens, car si l'on change le signe ω dans la valeur de e on voit qu'il suffit, pour que le produit ei garde le signe négatif, que la valeur de i change de signe également, c'est-à-dire que l'angle $\omega t + \varphi$ soit augmenté ou diminué de π ou le courant décalé de π, condition aisée à réaliser, car elle s'obtient automatiquement. Le sens de marche en synchronisme dépendra donc du sens dans lequel le moteur aura été lancé.

Réaction d'induit. — Puisque le courant a une direction opposée à celle qu'il possède dans le fonctionnement en générateur, la réaction d'induit du moteur sera inverse. Elle aura donc pour expression $- K i_{eff} \varphi$. Si le courant est décalé en arrière par rapport à la force contre-électromotrice du moteur, il augmentera l'intensité du champ et par suite la force contre-électromotrice et vice versa.

On constate par expérience que le décalage du courant d'un moteur synchrone tournant sous charge constante est fonction de l'excitation. D'abord décalé en arrière pour une faible excitation, il se rapproche de la concordance pour une excitation déterminée et enfin passe en avant si l'excitation

est encore augmentée. Ceci peut présenter un certain intérêt pour améliorer le facteur de puissance de la source, qui est fonction du décalage du courant débité.

Moteur synchrone polyphasé. — Un alternateur polyphasé n'étant rien autre qu'un alternateur à induits multiples, on conçoit que l'on puisse appliquer intégralement à ceux-ci le raisonnement fait précédemment, valable pour chacun d'eux considéré isolément.

L'alternateur polyphasé excité par un courant continu ne fournira donc de la puissance mécanique, que si les courants envoyés dans ses diverses sections à l'encontre des forces électromotrices engendrées par le déplacement des inducteurs, ont la même fréquence que celles-ci, c'est-à-dire qu'il y ait synchronisme.

La puissance absorbée par les diverses sections sera alors à chaque instant

$$e_1 i_1 = \mathrm{EI} \sin \omega t \sin (\omega t - \varphi) = \frac{\mathrm{EI}}{2} \cos \varphi - \frac{\mathrm{EI}}{2} \cos (2\omega t - \varphi)$$

$$e_2 i_2 = \mathrm{EI} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{n}\right) \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{n} - \varphi\right)$$

$$= \frac{\mathrm{EI}}{2} \cos \varphi - \frac{\mathrm{EI}}{2} \cos \left(2\omega t - 2 \cdot \frac{2\pi}{n} - \varphi\right)$$

en appelant comme précédemment φ le décalage des courants sur les forces contre-électromotrices, de sorte que la puissance totale sera

$$\mathrm{P} = \frac{n\mathrm{EI}}{2} \cos \varphi - \frac{\mathrm{EI}}{2} \sum_{p=0}^{p=n-1} \cos \left(2\omega t - p \cdot \frac{2\pi}{n} - \varphi\right) = \frac{n\mathrm{EI}}{2} \cos \varphi$$

dont on discuterait la valeur comme précédemment.

On verrait ainsi que le moteur doit être *accroché* par un lancé préalable; qu'il se décroche dès que le couple résistant dépasse la valeur maximum $\frac{n\mathrm{EI}}{2\omega_1}$ et qu'enfin sa vitesse de rotation, fonction de la fréquence des courants qui l'alimentent, est d'autant plus réduite que le nombre de ses

pôles est plus grand. Il est à remarquer que pour un décalage φ donné, la puissance est constante.

Démarrage des moteurs synchrones. — Puisqu'en dehors du synchronisme le couple moteur est nul, il faudra, par un moyen quelconque, amener la partie mobile de la machine à cette vitesse critique.

Les petits moteurs pourront être lancés à la main ou par un dispositif mécanique. En les raccordant à la génératrice par l'intermédiaire de lampes qu'un commutateur permet de mettre en court-circuit, on accélérera la vitesse, jusqu'à ce que les lampes s'éteignent. A ce moment le synchronisme est atteint et l'on supprime les lampes.

Si la génératrice alimentant le moteur peut être mise en marche en même temps que ce dernier, il suffira en général de donner à celui-ci une légère impulsion initiale pour qu'il se synchronise dès les premiers tours.

Les moteurs synchrones polyphasés peuvent démarrer sous charge, par la réaction des courants de Foucault qu'engendrent dans les tôles et les armatures de fixation de la partie mobile, les champs développés par la circulation des courants inducteurs. On favorise d'ailleurs cet effet en mettant les inducteurs en court-circuit, pendant le démarrage.

Les grands alternomoteurs actionnent en général leur excitatrice. On pourra faire charger des accumulateurs par celle-ci et la mise en marche s'effectuera en l'utilisant comme moteur alimenté par les accumulateurs. Aussitôt le synchronisme atteint, les connexions sont rétablies et le moteur est mis en relation avec le circuit d'alimentation.

§ 2. — MOTEURS ASYNCHRONES.

Le champ magnétique tournant. — La théorie des moteurs asynchrones est basée sur la considération du champ magnétique tournant. Reprenons (fig. 147) les n barreaux de la figure 136, tournant autour d'un axe O avec une vitesse

angulaire uniforme ω et dans lesquels ***nous envoyons***, cette fois, les courants polyphasés dont ils étaient le siège.

En supposant nul le décalage de ces courants sur leurs forces électromotrices, ils commenceront leur oscillation, quand les barreaux passent en a (fig. 147), c'est-à-dire avec la numérotation indiquée, que le passage par zéro se fera successivement dans les barreaux 1, n, $n - 1$, ..., après des temps égaux à $\frac{2\pi}{n\omega}$ secondes. Le conducteur 1, situé à la distance angulaire ωt de Oa, est traversé par un courant alternatif $i = \mathrm{I} \sin \omega t$ dirigé de l'avant à l'arrière et créant autour de lui un champ magnétique dont l'intensité h en O, perpendiculaire au plan du barreau et de l'axe, a pour valeur $k\mathrm{I} \sin \omega t$, k étant une constante positive dépendant de la perméabilité et des dimensions du système considéré.

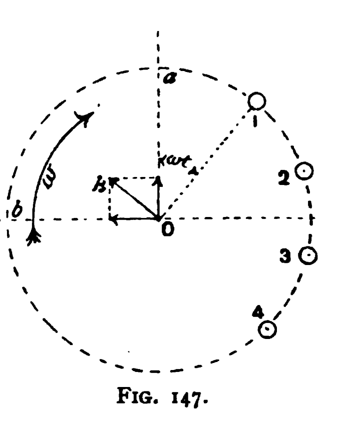


Fig. 147.

Projetée suivant Oa, cette intensité sera

$$k\mathrm{I} \sin^2 \omega t = \frac{k\mathrm{I}}{2} - \frac{k\mathrm{I}}{2} \cos 2\omega t;$$

projetée suivant la perpendiculaire Ob à Oa, elle donne la composante

$$k\mathrm{I} \sin \omega t \cos \omega t = \frac{k\mathrm{I}}{2} \sin 2\omega t.$$

Chaque barreau fournit ainsi deux composantes. Par exemple, le $(p+1)^{\text{ième}}$ barreau, situé à la distance $p\,\frac{2\pi}{n}$ du barreau 1, est parcouru par un courant alternatif dont l'intensité au moment considéré

$$i = \mathrm{I} \sin \left(\omega t + p \, . \, \frac{2\pi}{n}\right)$$

fournit les deux composantes

$$\frac{k\mathrm{I}}{2} - \frac{k\mathrm{I}}{2}\cos 2\left(\omega t + p\,.\,\frac{2\pi}{n}\right) \quad \text{et} \quad \frac{k\mathrm{I}}{2}\sin 2\left(\omega t + p\,.\,\frac{2\pi}{n}\right)$$

En additionnant les composantes dirigées suivant l'axe Oa, nous trouvons

$$\frac{nk\mathrm{I}}{2} - \frac{k\mathrm{I}}{2}\sum_{p=0}^{p=n-1}\cos 2\left(\omega t + p\,.\,\frac{2\pi}{n}\right) = \frac{nk\mathrm{I}}{2}$$

et, suivant l'axe Ob,

$$\frac{k\mathrm{I}}{2}\sum_{p=0}^{p=n-1}\sin 2\left(\omega t + p\,.\,\frac{2\pi}{n}\right) = 0.$$

L'intensité au milieu de l'axe est donc constante, égale à $\frac{nk\mathrm{I}}{2}$ et dirigée vers le point où les courants polyphasés commencent successivement leur oscillation. En résumé : n *barreaux siège de courants polyphasés de pulsation* ω, *tournant à la vitesse mécanique angulaire* ω, *donnent naissance à un champ magnétique fixe dans l'espace, dirigé vers le point où les courants polyphasés commencent leur oscillation.*

En nous plaçant sur les barreaux, le champ s'éloignera de nous avec la vitesse — ω. Mais, dans ces conditions, c'est comme si nous avions rendu les barreaux fixes. Si donc nous immobilisons les barreaux, le champ développé, dont les relations électromagnétiques avec les barreaux n'ont pas varié, va garder vis-à-vis d'eux la même vitesse relative, c'est-à-dire qu'il se déplacera avec la vitesse — ω. Nous en concluons que : n *conducteurs fixes, distribués autour d'un axe et parcourus par un système de courants polyphasés d'intensité maximum* I, *de fréquence* $\frac{\omega}{2\pi}$, *donnent naissance à un champ magnétique d'intensité* $\frac{nk\mathrm{I}}{2}$, *tournant dans l'espace avec une vitesse absolue* ω *et dans un sens tel que la direction de ce champ passe par les divers barreaux au moment où le courant y commence son oscillation.*

Changement du sens de rotation d'un champ tournant. — Il est évident qu'en renversant l'ordre de succession des

phases des courants alimentant les barreaux fixes, c'est-à-dire que si au lieu de se succéder dans les barreaux 1, n, $n-1$,..., cas de la figure 147, les passages par zéro se suivent dans les barreaux 1, 2, 3, ..., le champ tournant se déplacera en sens contraire. On atteindra ce but en actionnant en sens inverse la génératrice débitant les courants, mais ce moyen est inapplicable en pratique.

Nous avons vu qu'en permutant l'entrée et la sortie d'un courant alternatif, nous le décalons de 180°. Si nous considérons le système diphasé, par exemple, en renversant une des phases (en pointillé, fig. 148), on voit que l'ordre de leur succession se trouve interverti, puisque la phase 2, au lieu de succéder à la phase 1, la précède dès qu'elle est renversée (2'). Le champ tournant, qui suit les passages successifs par zéro, se déplacera en sens contraire. En effet, dans le premier cas le sens des passages par zéro était sur la circonférence inductrice 1, 2, ...; il est ensuite 2, 1, ... Le renversement est bien obtenu.

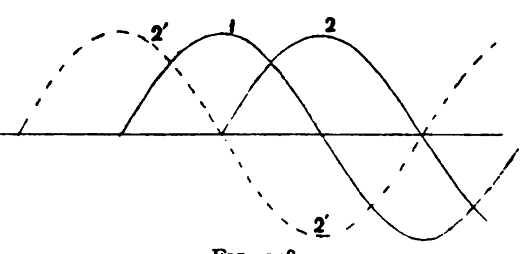


FIG. 148.

En courants triphasés, il suffira de permuter l'arrivée des courants d'alimentation dans les phases 1 et 3 sans toucher à la phase 2, pour modifier l'ordre de succession des phases et, par suite, intervertir le sens de rotation du champ tournant.

Moteur asynchrone polyphasé. — Son inducteur fixe, souvent appelé « stator », comporte n circuits distincts symétriquement distribués autour d'un axe (fig. 149). L'induit mobile autour du même axe, le « rotor », est constitué par m conducteurs symétriquement distribués, identiques entre eux et fermés d'une manière quelconque.

Quand on envoie dans l'inducteur *n* courants polyphasés d'intensité maximum I, ils donnent naissance à un champ $\mathcal{H} = \frac{nkI}{2}$, tournant avec la vitesse angulaire uniforme ω, dans un sens que nous considérerons comme positif.

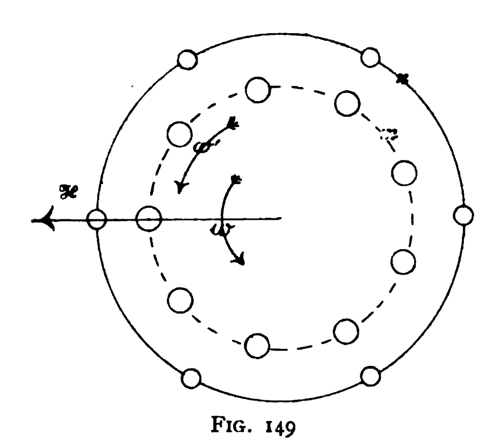


Fig. 149

Les conducteurs de l'induit, coupés par ce champ, vont devenir le siège de courants polyphasés donnant lieu à un champ magnétique, lequel, actionné par le champ inducteur, produira un couple moteur entraînant l'induit.

Supposons donc l'induit animé d'une vitesse angulaire ω' nécessairement dirigée dans le même sens que ω (sinon elle tendrait à augmenter indéfiniment ainsi que la force électromotrice et les courants induits) et évidemment moindre que ω, qui lui donne naissance.

La vitesse de l'induit par rapport au champ est $\omega' - \omega = -(\omega - \omega')$. Les phénomènes d'induction qui s'y passent sont les mêmes que si le champ étant fixe, l'induit se déplaçait avec la vitesse qu'il a par rapport au champ, c'est-à-dire avec la vitesse $-(\omega - \omega')$.

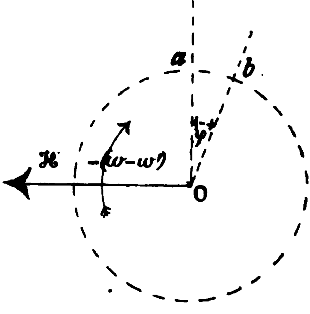


Fig. 150.

Admettons pour un instant qu'il en soit ainsi, afin de simplifier les calculs, en les ramenant à des cas précédemment examinés. Traçons (fig. 150) la direction momentanément fixe du champ magnétique, dans lequel l'induit va se mouvoir en sens contraire à ω et ω' et avec la vitesse $\omega - \omega'$.

Dans ces conditions, nous savons que m forces électromotrices polyphasées, proportionnelles à $\mathcal{H}(\omega - \omega')$, vont être développées dans les m barres de l'induit. La fréquence de ces forces électromotrices est $\frac{\omega - \omega'}{2\pi}$; elles commencent leur oscillation lorsque les barreaux se trouvent sur la perpendiculaire Oa à la direction du champ. En supposant les m conducteurs induits fermés sur autant de circuits extérieurs identiques et distincts, ils seront parcourus par un système de courants polyphasés, tous décalés d'un même angle φ sur leurs forces électromotrices et dont l'intensité I' est proportionnelle au champ et à la vitesse angulaire :

$$I' = k_1 \frac{\mathcal{H}(\omega - \omega')}{r} \cos\varphi = k_1 \frac{\mathcal{H}(\omega - \omega')}{\sqrt{r^2 + (\omega - \omega')^2 \mathcal{L}^2}}, \qquad (1)$$

r et $\mathcal{L}$ étant la résistance et le coefficient de selfinduction de chacun de ces circuits.

Les courants polyphasés de l'induit commencent donc leur oscillation φ radians plus loin que Oa, en Ob, et, d'après ce que nous avons vu dans l'étude du champ tournant, ils vont donner lieu à un champ fixe dans l'espace, ayant la direction Ob et d'intensité

$$\mathcal{H}' = \frac{mKI'}{2} = \frac{mKk_1\mathcal{H}(\omega - \omega')}{2r} \cos\varphi. \qquad (2)$$

Les deux champs $\mathcal{H}$ et $\mathcal{H}'$ agissent mécaniquement l'un

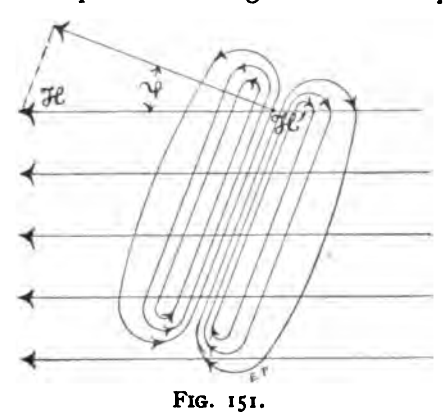


FIG. 151.

sur l'autre (fig. 151), de sorte que l'induit est sollicité dans

le sens de la rotation effective par un couple mécanique proportionnel à $\mathcal{H}\mathcal{H}'$ cos φ. Nous aurons donc

$$C = \frac{K'\mathcal{H}^2(\omega - \omega')}{r} \cos^2 \varphi = \frac{K'\mathcal{H}^2\omega_1 \cos^2 \varphi}{r} \qquad (3)$$

en appelant ω_1 la différence entre la vitesse du champ et celle de l'induit, ou *glissement* de l'induit par rapport au champ.

Éliminons $\cos^2 \varphi$. L'équation (1) nous donne

$$\frac{\cos \varphi}{r} = \frac{1}{\sqrt{r^2 + \omega_1^2 \mathcal{L}^2}},$$

d'où

$$\cos^2 \varphi = \frac{1}{1 + \frac{\omega_1^2 \mathcal{L}^2}{r^2}} \quad \text{et enfin} \quad C = \frac{K'\mathcal{H}^2}{r} \frac{\omega_1}{1 + \frac{\omega_1^2 \mathcal{L}^2}{r^2}}. \qquad (4)$$

Telle est l'expression du couple.

Remarquons que rien ne change dans la valeur des considérations ci-dessus, du fait de la rotation du champ tournant, ce qui nous permet de conclure que *le champ créé par l'induit* faisant pour un régime donné l'angle constant $\frac{\pi}{2} + \varphi$, avec le champ tournant, doit tourner avec lui et avec la même vitesse angulaire ω.

En résumé, *l'induit est traversé par le champ tournant à la vitesse ω qu'envoient les inducteurs; cette traversée ne se fait que moyennant la production dans l'induit de courants polyphasés donnant eux-mêmes naissance à un champ, décalé sur le premier d'un angle plus grand qu'un angle droit, d'une quantité dépendant de la résistance et du coefficient de self-induction des circuits induits, et tournant avec la même vitesse angulaire que le champ inducteur; l'induit est tiré par les lignes de force de ce second champ proportionnel au premier avec une vitesse ω' et application d'un couple* C, *développant la puissance mécanique* $P = \omega' C$.

Discussion de la valeur du couple. — A intensité constante du champ tournant, le couple est donc uniquement fonction du glissement. La figure 152 traduit graphiquement cette fonction.

Synchronisme. — Le couple est nul pour un glissement nul, c'est-à-dire pour la vitesse de synchronisme. A ce moment $\omega' = \omega$ et l'induit tourne précisément à la vitesse angulaire de la force électromotrice. En d'autres termes, il ferait alors autant de tours que les courants inducteurs accomplissent de périodes par seconde. Son nombre de tours par seconde N serait donc égal à f fréquence des courants d'alimentation. Toutefois, comme l'induit ne serait plus le

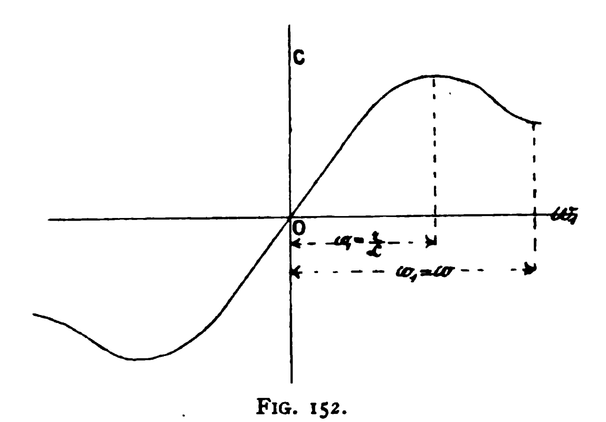


Fig. 152.

siège d'aucune force électromotrice, donc d'aucun courant, le couple serait nul comme nous venons de le dire. C'est donc un cas théorique. Retenons toutefois, qu'abstraction faite du glissement, un barreau quelconque de l'induit suit exactement le champ tournant développé. En d'autres termes, il marche avec la vitesse angulaire des courants polyphasés de l'inducteur.

Dépassement du synchronisme. — Pour des valeurs égales et contraires du glissement, le couple a des valeurs égales et contraires également, ce qui veut dire que dès que l'on dépasse le synchronisme ($\omega' > \omega$), le moteur se transforme en génératrice. Nous trouvons là un moyen nouveau pour produire des courants polyphasés de fréquence $\omega' - \omega$, par l'intermédiaire d'un champ tournant à la vitesse ω, dans lequel se meut un induit à la vitesse $\omega' > \omega$.

COUPLE MAXIMUM. — La valeur du couple peut se mettre sous la forme :

$$C = K'' \frac{\omega_1}{r + \frac{\omega_1^2 \mathcal{L}^2}{r}} = K'' \frac{1}{\frac{r}{\omega_1} + \frac{\omega_1 \mathcal{L}^2}{r}}.$$

Le minimum de la somme de deux nombres variables dont le produit est constant ayant lieu lorsque ces deux nombres sont égaux, le dénominateur sera minimum et, par suite, la valeur de couple sera maximum quand

$$\frac{r}{\omega_1} = \frac{\omega_1 \mathcal{L}^2}{r} \quad \text{ou} \quad r = \omega_1 \mathcal{L} \quad \text{et} \quad \omega_1 = \frac{r}{\mathcal{L}}.$$

Alors

$$C = \frac{K''' \mathcal{H}^2}{2 \mathcal{L}}.$$

DÉMARRAGE. — Au démarrage $\omega' = 0$, $\omega_1 = \omega$, et le couple a pour valeur

$$\frac{K' \mathcal{H}^2}{r} \frac{\omega}{1 + \frac{\omega^2 \mathcal{L}^2}{r^2}},$$

puis, au fur et à mesure que ω_1 décroît, la valeur du couple se modifie. Si la valeur initiale du glissement $\omega > \frac{r}{\mathcal{L}}$, nous partons d'un point au delà du maximum et le couple croît; si $\omega = \frac{r}{\mathcal{L}}$, le couple est maximum; enfin, si $\omega < \frac{r}{\mathcal{L}}$, le maximum est dépassé et, au fur et à mesure que ω_1 décroît, le couple devient moindre. Dans le voisinage du synchronisme, si le couple résistant augmente, ω_1 augmente, ainsi que le couple moteur; le récepteur a une marche stable entre de grandes limites de vitesse.

Nous venons de voir que le couple moteur est maximum quand $\omega = \frac{r}{\mathcal{L}}$. Si cette condition n'est pas naturellement satisfaite par construction, il est utile de la réaliser. Pour cela, on montera en série avec les sections de l'induit (donc,

en étoile, si celui-ci est connecté en étoile; en polygone, s'il affecte cette dernière forme) par l'intermédiaire de bagues et de balais, les résistances voulues, lesquelles, après démarrage, seront supprimées soit à la main, soit automatiquement. L'emploi de ces résistances empêche aussi les courants de prendre une valeur trop grande (1).

Induit à cage d'écureuil. — Dans les petits moteurs, cette éventualité n'est pas à craindre, et l'on constitue très simplement et solidement l'induit, de barreaux parallèles, métalliquement réunis à leurs extrémités par des anneaux. La forme rappelle exactement la *cage d'écureuil,* d'où son nom.

Moteur Boucherot. — M. Boucherot (°) est arrivé à supprimer complètement les résistances additionnelles dans tous les cas, en composant l'inducteur de deux anneaux semblables réunis soit en quantité, soit en tension, dont l'un est mobile et peut être déplacé d'un certain angle autour de l'axe de rotation commun. L'induit est constitué par deux cages d'écureuil semblables, dont les extrémités en regard sont réunies par une frette en métal de grande résistivité (fer, maillechort ou ferro-nickel).

Nous avons trouvé plus haut que le couple est maximum quand $\omega_1 \mathcal{L} = r$. Comme ω_1 est maximum au démarrage, pour que le couple moteur soit maximum, il faut que r soit aussi maximum à ce moment, d'où, comme nous l'avons vu plus haut, l'insertion de résistances dans l'induit.

Dans le moteur Boucherot, on déplace le second inducteur de manière que ses enroulements aient tourné par rapport aux enroulements de l'autre, de l'espace angulaire correspondant à une demi-période. Dans le cas des inducteurs bipolaires envisagés jusqu'ici, la partie mobile de l'inducteur devrait tourner de 180°. Dans ces conditions, les forces électromotrices engendrées dans les deux moitiés de l'induit sont en opposition et les courants se réunissent en

(°) *Électricien,* nos 385, 386 et 387 de 1898.

quantité à travers la frette résistante, qui est calculée pour satisfaire à l'équation ci-dessus. Le moteur démarre et on réduit alors progressivement l'angle des deux systèmes, jusqu'à ce que les deux moitiés de l'inducteur soient en concordance. Il ne passe plus alors aucun courant dans la frette.

Quand le moteur est inaccessible, M. Boucherot compose l'induit de deux cages concentriques, l'une extérieure à grande résistance et faible coefficient de selfinduction, l'autre à faible résistance et grand coefficient de selfinduction. Au démarrage, celle-ci ne joue pour ainsi dire aucun rôle, vu le grand glissement existant, et le couple est fort à cause de la grande résistance de la première cage. En marche normale, les deux cages contribuent au couple chacune pour sa part.

Moteurs multipolaires. — Ce que nous venons de dire s'applique à des inducteurs bipolaires, c'est-à-dire armés d'une seule série de conducteurs ou bobines traversés par un système de courants polyphasés. Dans ces conditions, l'induit tourne avec une vitesse $\omega' = \left(\frac{100-g}{100}\right)\omega$, g étant le glissement en °/₀, lequel n'est, en général, que de quelques centièmes de ω. On aura donc très sensiblement $\omega' = \omega$ ou $2\pi N = 2\pi f$ et $N = f$: *abstraction faite du glissement, l'induit fait autant de tours par seconde que les courants inducteurs accomplissent d'oscillations pendant le même temps.*

Si cette vitesse est trop grande, ou si le moteur est de grande puissance, on recourt aux enroulements multipolaires. La circonférence de l'inducteur est divisée en $k \cdot n$ circuits ou bobines numérotés (fig. 153) : 1, 2, 3, ... n; 1, 2, 3, ... n; 1, 2, 3, ... n ...; tous les circuits de même numéro sont réunis soit en tension, soit en dérivation, et on envoie n courants polyphasés dans les enroulements complexes ainsi formés. L'induit présente, de

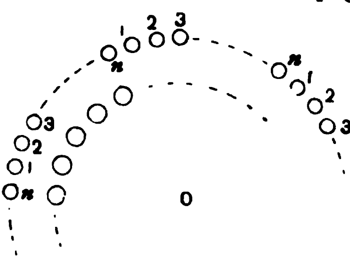


Fig. 153.

son côté, une disposition semblable ou est simplement établi en cage d'écureuil.

Dans ces conditions, on n'a plus affaire à un champ unique, mais bien à n champs radiaux se déplaçant avec la vitesse angulaire ω et engendrant dans les barres voisines du rotor, n champs induits réagissant avec les premiers. Ces champs induits parcourent le $\left(\frac{1}{k}\right)^e$ de la circonférence pour chaque oscillation des courants inducteurs, soit, puisque ces derniers font f oscillations par seconde, $\frac{f}{k}$ fois la longueur de la circonférence, tant du stator que du rotor. Les barreaux de ce dernier suivant d'ailleurs exactement les champs induits (à part le glissement), l'induit lui-même ne fera plus que $\frac{f}{k}$ tours par seconde au lieu de f.

Moteur asynchrone monophasé. — L'induit est le même que dans les appareils bipolaires étudiés précédemment, mais le champ inducteur, alimenté par un courant alternatif, est lui-même alternatif et de direction fixe dans l'espace.

On peut facilement ramener sa théorie à celle du moteur asynchrone polyphasé, en se basant sur le théorème suivant, dû à M. Leblanc : *Un champ alternatif* $\mathcal{H} \cos \omega t$ *peut être remplacé par deux champs d'intensité constante* $\frac{\mathcal{H}}{2}$, *tournant en sens inverse l'un de l'autre avec la vitesse de pulsation* ω *du champ fixe et symétriquement situés par rapport à celui-ci.* En d'autres termes, le champ fixe se trouve constamment sur la bissectrice de la direction moyenne des deux premiers.

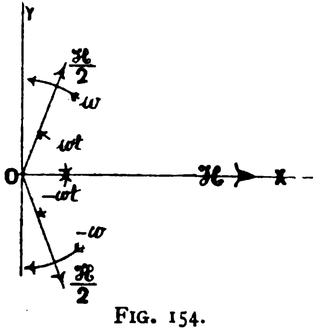


FIG. 154.

Soient, en effet (fig. 154), un champ de direction fixe $\mathcal{H} \cos \omega t$ et deux champs $\frac{\mathcal{H}}{2}$ tournant en sens inverse, à la vitesse de ω radians par seconde et passant simultanément par l'axe des X, que nous faisons coïncider avec la direction du champ fixe. A l'instant t, les deux champs tournants font respectivement les

angles ωt et $-\omega t$ avec l'axe des X. Projetons leurs intensités sur cet axe. Nous obtenons

$$\frac{\mathcal{H}}{2}\cos\omega t + \frac{\mathcal{H}}{2}\cos(-\omega t) = \mathcal{H}\cos\omega t,$$

tandis que les projections sur l'axe des Y

$$\frac{\mathcal{H}}{2}\sin\omega t + \frac{\mathcal{H}}{2}\sin(-\omega t) = 0,$$

ce qui démontre la propriété énoncée.

Si nous supposons maintenant qu'un induit de moteur asynchrone se meut avec la vitesse ω' dans un champ alternatif passant par son axe, nous pourrons remplacer le champ inducteur par les deux champs tournants qui lui sont équivalents et appliquer successivement, à ces deux champs, la formule précédemment trouvée.

Le glissement de l'induit par rapport au premier champ sera $\omega' - \omega = -(\omega - \omega')$ et $\omega' + \omega$ par rapport au second. Le glissement $-(\omega - \omega')$ étant inférieur à la vitesse de synchronisme, correspondra au couple moteur

$$K\frac{\mathcal{H}^2}{4}\;\frac{\omega - \omega'}{r\left[1 + \frac{(\omega - \omega')^2\mathcal{L}^2}{r^2}\right]},$$

tandis que l'autre $\omega + \omega'$, lui étant supérieur, donnera lieu pour le second champ au couple résistant

$$K\frac{\mathcal{H}^2}{4}\;\frac{\omega + \omega'}{r\left[1 + \frac{(\omega + \omega')^2\mathcal{L}^2}{r^2}\right]},$$

$\mathcal{L}$ et r étant, comme précédemment, le coefficient de self-induction et la résistance de chacune des sections de l'induit.

En somme, l'induit développera le couple moteur

$$C = \frac{K\mathcal{H}^2}{4r}\left[\frac{\omega - \omega'}{1 + \frac{(\omega - \omega')^2 \mathcal{L}^2}{r^2}} - \frac{\omega + \omega'}{1 + \frac{(\omega + \omega')^2 \mathcal{L}^2}{r^2}}\right]$$

et la puissance mécanique $P = \omega' C$.

Au démarrage $\omega' = 0$ et $C = 0$. Le couple étant nul, le moteur ne démarrera pas de lui-même. Traçons son dia-

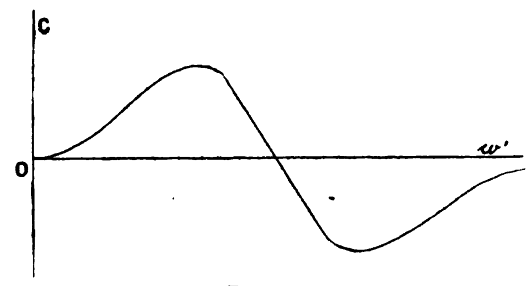


Fig. 155.

gramme (fig. 155). Partant de la valeur nulle de démarrage, le couple croît, passe par un maximum, décroît et repasse par zéro pour la valeur

$$\omega' = \sqrt{\omega^2 - \frac{r^2}{\mathcal{L}^2}}$$

en général voisine du synchronisme. Au delà de ce point, sa valeur devient négative. Entre ce zéro et le maximum positif la stabilité de marche est assurée, car à une augmentation du couple résistant qui provoque un ralentissement de l'induit, correspond une augmentation du couple moteur.

Démarrage des moteurs monophasés. — Puisque le couple est nul au démarrage, il faudra user d'expédients analogues à ceux requis par les moteurs synchrones, pour les mettre en marche.

Un dispositif souvent employé, consiste à munir l'inducteur du moteur d'un enroulement auxiliaire disposé généralement

entre les bobines du premier et dans lequel on envoie, à la mise en marche, un courant fortement décalé par rapport aux courants d'alimentation. On obtient ces différences de décalages en donnant aux deux circuits inducteurs des facteurs très différents : par exemple l'un présente une grande résistance et un faible coefficient de selfinduction, l'autre une faible résistance et un grand coefficient de selfinduction. On peut aussi donner à ce dernier une certaine capacité, en y embrochant un condensateur. Dans ces conditions, les deux circuits sont traversés par des courants sensiblement diphasés; ils donnent lieu à un champ tournant qui fait démarrer l'induit, comme dans le cas du moteur asynchrone. Une fois le synchronisme atteint, on supprime le courant dans l'enroulement auxiliaire.

Bobinage des moteurs asynchrones. — Inducteur. — Le bobinage de l'inducteur peut s'effectuer par sections séparées soit en anneau, soit en tambour. Les connexions de ces sections lui font affecter le schéma de l'étoile ou du polygone.

Induit. — On adopte toujours la cage d'écureuil pour le rotor des petits moteurs. Les grands sont bobinés comme leur inducteur; les extrémités des bobines aboutissent à trois bagues isolées sur lesquelles appuient des balais en rapport avec les résistances de démarrage, qu'on supprime dès que le régime est atteint. Cette dernière manœuvre est souvent assurée automatiquement.

CHAPITRE XIII

LES TRANSFORMATEURS

§ 1. — COURANTS ALTERNATIFS TRANSFORMÉS EN COURANTS ALTERNATIFS.

On peut avoir pour objet de transformer la tension et l'intensité de courants qui gardent leur forme et les transformateurs sont *homomorphiques;* ou bien, on modifie en outre la *nature* du courant alternatif, ondulé ou pulsatoire, et l'on a affaire à des transformateurs hétéromorphiques.

I. **Appareils homomorphiques. Transformateur monophasé.** — Théorie. — Nous avons vu qu'il y a phénomène d'induction dès que le flux magnétique traversant un circuit varie, et cela quelle que soit la cause de la variation du flux.

Un transformateur comporte deux bobines de fil isolé (fig. 156), enroulées sur un noyau en métal magnétique, en pratique le fer doux, convenablement subdivisé pour éviter la production de courants de Foucault.

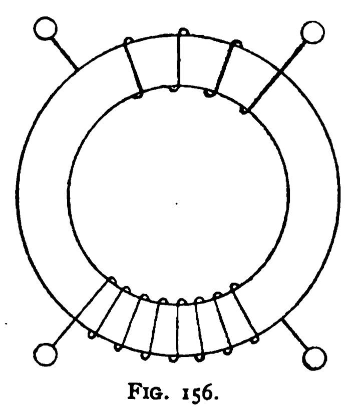


Fig. 156.

Quand on fait passer un courant variable dans un des enroulements, le *primaire*, le flux magnétique variable qu'il développe induit dans le second enroulement, le ***secondaire***, qui embrasse ce flux, des forces électromotrices d'induction de même fréquence, lesquelles, si le circuit secondaire est fermé, y engendrent un courant alternatif.

Tous les organes sont dont fixes, d'où le nom de transformateurs ***statiques*** souvent donné à ces appareils.

Pour simplifier, nous négligerons les pertes de puissance, tant par effet Joule que par hystérésis et courants de Foucault. Ces pertes ne s'élèvent d'ailleurs, dans de bons transformateurs marchant à pleine charge, qu'à quelques centièmes.

Appelons e_1 la force électromotrice appliquée aux extrémités de la bobine primaire, i_1 le courant qui la parcourt à l'instant t, r_1 sa résistance, n_1 son nombre de spires et Φ le flux magnétique traversant le noyau.

A chaque instant, la force électromotrice agissant aux bornes du primaire, doit équilibrer la force électromotrice effective et la force électromotrice induite dans ce circuit par la variation du flux

$$e_1 = r_1 i_1 + n_1 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Nous négligeons la résistance r_1, de sorte qu'il reste

$$e_1 = E_1 \sin \omega t = n_1 \frac{d\Phi}{dt},$$

ce qui revient à supposer la force électromotrice primaire simplement égale et opposée à la force électromotrice d'induction dont le primaire est le siège.

On tire de cette équation

$$\Phi = \int \frac{E_1}{n_1} \sin \omega t \, dt = -\frac{E_1}{n_1 \omega} \cos \omega t = -\mathcal{M} \cos \omega t. \quad (1)$$

On a donc

$$e_1 = n_1 \mathcal{M} \omega \sin \omega t. \quad (2)$$

Remarquons, en premier lieu, que puisque

$$-\cos \omega t = \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

le flux se trouve décalé de $\frac{\pi}{2}$ en arrière sur la force électromotrice primaire.

Le flux $-\mathcal{M} \cos \omega t$ traversant chacune des spires du secondaire, en supposant nulles les fuites entre le primaire et

le secondaire, ce dernier embrasse le flux total $-n_2\mathcal{N}\cos\omega t$. La force électromotrice y induite sera, en vertu de la loi générale de l'induction,

$$e_2 = -(+n_2\mathcal{N}\omega\sin\omega t) = -n_2\mathcal{N}\omega\sin\omega t = -E_2\sin\omega t. \quad (3)$$

Elle sera donc décalée de π en arrière sur la force électromotrice primaire et de $\frac{\pi}{2}$ en arrière sur le flux.

Comparons les valeurs absolues des forces électromotrices primaires et secondaires

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{n_1\mathcal{N}\omega}{n_2\mathcal{N}\omega} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (4)$$

Première propriété : *Les forces électromotrices primaires et secondaires se trouvent dans le même rapport que les nombres de spires de leurs enroulements,* ce qui permettra de transformer à volonté un voltage donné en un autre quelconque.

Le circuit primaire étant doué de réactance, le courant qui le traverse sera décalé d'un angle φ_1 en arrière sur sa force électromotrice

$$i_1 = I_1\sin(\omega t - \varphi_1) = I_1\sin\omega t\cos\varphi_1 - I_1\cos\omega t\sin\varphi_1$$

et l'énergie dépensée dans cet enroulement aura pour expression :

$$\frac{E_1 I_1}{2}\cos\varphi_1.$$

Supposons le secondaire fermé sur un circuit extérieur de résistance apparente r_2, de façon que le courant i_2 qui traverse ce circuit soit décalé d'un angle φ_2. On aura :

$$i_2 = -\frac{E_2}{r_2}\sin(\omega t - \varphi_2) = -I_2\sin(\omega t - \varphi_2)$$
$$= -I_2\sin\omega t\cos\varphi_2 + I_2\cos\omega t\sin\varphi_2$$

et l'énergie développée sera

$$\frac{E_2 I_2}{2}\cos\varphi_2.$$

Les pertes étant supposées nulles,

$$\frac{E_1 I_1}{2} \cos \varphi_1 = \frac{E_2 I_2}{2} \cos \varphi_2, \text{ d'où } n_1 I_1 \cos \varphi_1 = n_2 I_2 \cos \varphi_2. \quad (5)$$

Les portions $I_1 \sin \omega t \cos \varphi_1$ et $I_2 \sin \omega t \cos \varphi_2$ des courants, concordantes avec les forces électromotrices et qui seules interviennent par leurs valeurs maxima $I_1 \cos \varphi_1$, $I_2 \cos \varphi_2$, dans l'expression de l'énergie, sont appelées, ainsi que nous l'avons vu, courants wattés. Comme on a, en vertu de (5)

$$\frac{I_1 \cos \varphi_1}{I_2 \cos \varphi_2} = \frac{n_2}{n_1} = c^{te},$$

on voit que les intensités des courants wattés, inversement proportionnelles aux nombres de spires, sont proportionnelles entre elles, de sorte que, deuxième propriété : *Plus le secondaire absorbe d'énergie, plus le primaire lui en fournit.* Quand le secondaire est ouvert, le courant watté est nul dans le primaire.

Les portions déwattées (parce qu'elles sont décalées de $\frac{\pi}{2}$ sur leurs forces électromotrices respectives) $-I_1 \cos \omega t \sin \varphi_1$ et $+I_2 \cos \omega t \sin \varphi_2$ des intensités des courants qui sont respectivement concordante et décalée de π par rapport au flux magnétique $-\mathfrak{N} \cos \omega t$, portent plus spécialement le nom de *courants de magnétisation*. Il est en effet facile de démontrer que ce sont elles qui concourent à la magnétisation du noyau. La force magnétomotrice est à chaque instant égale à 4π fois le nombre d'ampères-tours totaux des deux enroulements, en tenant, bien entendu, compte du sens de circulation des courants. On a donc

$$-\mathfrak{N} \cos \omega t = \frac{4\pi(n_1 i_1 + n_2 i_2)}{\mathfrak{R}}.$$

Remplaçant i_1 et i_2 par les valeurs trouvées précédemment, et introduisant la condition

$$n_1 I_1 \cos \varphi_1 = n_2 I_2 \cos \varphi_2,$$

il vient :

$$n_1 I_1 \sin \varphi_1 - n_2 I_2 \sin \varphi_2 = \frac{\mathfrak{N}\mathfrak{R}}{4\pi} \quad (6)$$

relation montrant bien le rôle magnétisant joué par les courants déwattés.

Alimentons (ce qui est le cas général) le circuit primaire sous force électromotrice efficace constante, donc $E_1 = C^{te}$. En vertu de (1), $\mathfrak{N}$ le flux maximum deviendra constant et, par conséquent, indépendant de la charge dans le secondaire. $\mathfrak{N}$ étant constant, à mesure que I_2 diminue, le courant déwatté primaire diminue (6), de façon à maintenir la même valeur à la force magnétomotrice. Quand le secondaire est ouvert, on a pour le courant déwatté primaire

$$n_1 I_1 \sin \varphi_1 = \frac{\mathfrak{N} \cdot \mathfrak{R}}{4\pi}.$$

Ce courant est alors minimum. Nous avons vu, d'autre part, qu'à ce moment le courant watté primaire est nul, de sorte qu'aucune énergie ne serait dépensée dans le primaire.

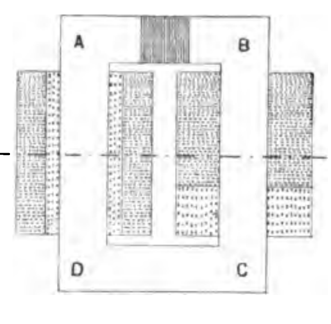
Cette conclusion forcée ne peut être tirée, que parce que nous avons supposé nulle la résistance du primaire. En réalité, celui-ci présente une certaine résistance d'ailleurs très faible, de sorte qu'à circuit secondaire ouvert il ne reste en dérivation sur les circuits d'alimentation qu'une bobine de forte réactance. Le courant qui passe est donc non seulement faible, mais fortement décalé sur sa force électromotrice. Il en résulte que la puissance dépensée par effet Joule dans le circuit primaire à secondaire ouvert, $e_{1\,eff}\, i'_{1\,eff} \cos \varphi'_1$, se trouve très réduite en raison de la faiblesse de $i'_{1\,eff}$ et de $\cos \varphi'_1$. D'autre part, les pertes par courants de Foucault et hystérésis sont très faibles dans les bons appareils. Donc, troisième et importante propriété : *A vide, l'appareil consomme peu.*

Pertes d'énergie dans les transformateurs. — 1° Les courants de Foucault et l'hystérésis donnent lieu à une perte, fonction de la fréquence, du flux maximum et du volume du fer. On réduit les courants de Foucault en constituant le noyau de feuilles minces ou de fils de fer vernis. Il est à remarquer que les pertes par hystérésis sont indépendantes de la charge dans les transformateurs à tension primaire con-

stante, puisque le flux maximum y reste constant; 2° l'effet Joule dans les enroulements donne lieu à une perte augmentant avec la charge. A vide, cette perte n'est pas nulle, comme nous l'avons fait remarquer. Elle sera d'autant moindre que le décalage sera plus grand. Or, celui-ci dépend du coefficient de selfinduction de l'enroulement primaire, lequel est d'autant plus important que le circuit magnétique de l'appareil est moins réluctant. A ce point de vue, il y a intérêt d'employer des transformateurs à circuit magnétique fermé.

Types généraux. — TRANSFORMATEURS A NOYAU. — Les bobines peuvent être extérieures au circuit magnétique (fig. 157, 158), lequel dans ce cas est simple et affecte la forme d'un noyau.

Le noyau ou carcasse magnétique ABCD est constitué de tôles minces de 0,3 à 0,5 millimètre d'épaisseur, isolées par du vernis, du papier ou simplement une couche d'oxyde.



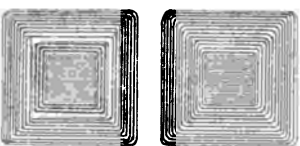


FIG. 157 et 158.

Pour diminuer la réluctance, on évitera le plus possible les joints. La carcasse se composera donc d'une pièce en U ADCB sur les branches verticales de laquelle on passera les enroulements préalablement bobinés sur un mandrin en bois. Le circuit magnétique se fermera par les parties AB fixées aux montants AD, BC. Les joints seront soigneusement fraisés et, s'ils sont plats, on y interposera une feuille de papier, pour éviter qu'un manque d'exacte concordance des tôles ne permette la production de courts-circuits favorisant le développement de courants de Foucault. Dans le même ordre d'idées, on adopte parfois des joints imbriqués (assemblage par tenons et mortaises), mais ils sont plus compliqués.

Chacun des noyaux AD, BC porte une bobine primaire et une secondaire qui peuvent occuper deux positions bien tranchées l'une par rapport à l'autre : ou bien elles sont juxtaposées (noyau AD, fig. 157) ou simplement accolées noyau BC). La première disposition, un peu moins aisée pour le montage, est supérieure comme effet utile. Dans le cas de l'accolement, en effet, une assez grande partie des lignes de force émises par le primaire se ferme dans l'air environnant et ne traverse pas le secondaire, dispersion encore accentuée par le décalage de 180° existant entre les courants magnétisants des deux enroulements, qui tend à développer entre eux des pôles conséquents.

Transformateurs cuirassés. — Dans ceux-ci (fig. 159 et 160) les bobines sont noyées dans le fer, soit partiellement, soit totalement.

Le circuit magnétique est alors double, le flux créé dans la partie centrale se subdivise par parties égales dans les revêtements extérieurs, dont la section est précisément la moitié de celle du noyau central.

Cette disposition est moins bonne au point de vue du refroidissement des bobines, mais le circuit magnétique est plus court et, partant, sa section peut être réduite.

Mêmes observations que précédemment au sujet des joints et de la disposition relative des bobines primaires et secondaires.

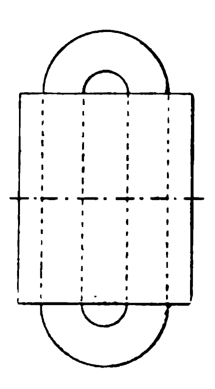


Fig. 159 et 160.

Transformateurs polyphasés. — Les courants polyphasés étant des courants alternatifs, peuvent être transformés individuellement au moyen des appareils précédents. Mais, quand on peut assurer (ce qui est toujours désirable) la constance de l'égalité de la charge des diverses phases, il est plus simple, moins coûteux et moins encombrant d'établir un transformateur spécial, en tenant compte qu'il s'agit ici de quantités polyphasées.

Soient n bobines identiques parcourues par n courants polyphasés, et supposons les flux concordants avec les courants, ce qui ne changera rien à nos conclusions. Le premier noyau développant un flux alternatif $\mathcal{M} \sin \omega t$, le précédent sera traversé par le flux $\mathcal{M} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{n}\right)$ et le suivant par le flux $\mathcal{M} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{n}\right)$. La différence de ces flux

$$\mathcal{M} \sin \omega t - \mathcal{M} \sin\left(\omega t \pm \frac{2\pi}{n}\right) = 2\mathcal{M} \sin \frac{\mp\pi}{n} \cos\left(\omega t \pm \frac{\pi}{n}\right)$$

a pour valeur maximum $2\mathcal{M} \sin \frac{\pi}{n}$, de sorte qu'il suffira que les culasses réunissant les noyaux aient une section proportionnelle à $2\mathcal{M} \sin \frac{\pi}{n}$.

Par exemple, pour les courants diphasés

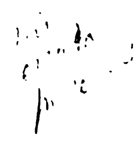
$$\frac{\pi}{n} = \frac{\pi}{4}; \ \sin \frac{\pi}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2}; \ 2\mathcal{M} \sin \frac{\pi}{4} = \sqrt{2}\, \mathcal{M}$$

et il suffira de présenter au flux résultant traversant la culasse C (fig. 161) une section $\sqrt{2}$ fois plus grande que celle des noyaux eux-mêmes.



Pour les courants triphasés

$$2\mathcal{M} \sin \frac{\pi}{3} = \sqrt{3}\, \mathcal{M}$$



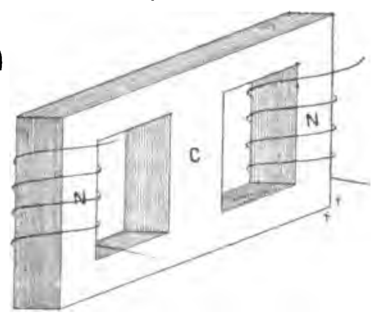




FIG. 161.

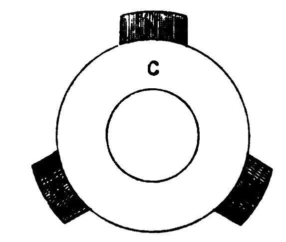


FIG. 162.

on agencera (fig. 162) trois noyaux de section S réunis haut et bas par les deux anneaux de section $\sqrt{3}$ S.

Comme toujours, et ainsi que l'indiquent les figures 161 et 162, noyaux et culasses seront formés de paquets de tôles minces isolées.

Refroidissement et isolation des transformateurs. — Les petits transformateurs présentent toujours une surface suffisante pour le refroidissement. Malgré leur meilleur rendement, les appareils puissants s'échauffent davantage, la surface croissant moins vite que le volume. On prévient un échauffement exagéré en provoquant une circulation d'eau autour des noyaux et des bobines; en adoptant une ventilation artificielle; ou en plongeant le transformateur dans un bain d'huile de pétrole dense, contenue dans une cuve métallique pourvue au besoin d'ailettes facilitant le rayonnement par convection.

L'huile agit aussi comme isolant et l'appareil est en outre isolé du sol, au moyen d'isolateurs en porcelaine.

Coefficients de construction admis. — Pour réduire la section du fer et la dépense d'excitation à un minimum, il conviendra d'adopter des inductions pour lesquelles la perméabilité est grande, soit des valeurs de $\mathfrak{B}$ maximum comprises entre 3 000 et 7 500 gauss. En outre, comme les pertes par courants de Foucault et hystérésis croissent avec la fréquence et sont proportionnelles à l'induction, il y aura lieu, pour maintenir un bon rendement, de *réduire l'induction avec la fréquence.*

Ainsi, d'après M. Kolben, alors qu'à 40 périodes par seconde, l'induction maximum peut atteindre de 5 500 à 6 500 gauss; pour 60 périodes par seconde, l'induction maximum ne devra pas dépasser 4 500 à 5 000 gauss, et pour 120 périodes par seconde 3 000 à 3 500 gauss.

La section réelle du fer en fonction de la section totale s'élève à 0,80.

Densité du courant : dans l'enroulement à gros fil 1 A par millimètre carré de section; dans l'enroulement à fil fin 1 à 1,5 A par millimètre carré de section.

Perte par courants de Foucault et hystérésis à pleine charge 0,01 à 0,04.

Effet Joule dans chacun des enroulements à pleine charge 0,01 à 0,02.

Surface de refroidissement, total fer et cuivre en centimètres carrés exposés à l'air libre, par watt 20 à 50.

Échauffement : pour le fer et le gros fil, 60° C; pour le fil fin, 40° C.

Rendements et poids. — Le tableau suivant donne des chiffres *moyens* relatifs à des appareils modernes.

PUISSANCE EN KW.		1	10	25	50	100	150	1 000
Rendements en °/o	monophasé, diphasé. . .	92.5	96	96.5	96,75	97	97	98.3
	triphasé . .	91,5	95	96,5	96,75	97	97.25	
Poids en kg	monophasé, diphasé. . .	70	320	590	960	1 650	2 000	23 000
	triphasé . .	125	435	800	1 500	2 340	3 250	

Une propriété précieuse réside dans la grande valeur qu'atteint le rendement même aux faibles charges et pour les surcharges, comme il résulte du tableau suivant relatif à des appareils de 5 kw, fréquence 60 :

0,10	de la charge,	de	0,842 à 0,876.
0,25	»	»	0,927 à 0,941.
0,50	»	»	0,954 à 0,962.
0,75	»	»	0,961 à 0,965.
1	»	»	» »
1,25	»	»	0,954 à 0,965.

II. **Transformateurs hétéromorphiques. Bobine de Ruhmkorff.** — La bobine de Ruhmkorff constitue un cas particulier des transformateurs précédents, en ce sens qu'on l'alimente au moyen d'un simple *courant continu*, périodiquement interrompu, c'est-à-dire d'un courant *pulsatoire*.

C'est le transformateur d'induction le plus anciennement connu. D'après ce que nous avons dit dans le rappel des notions fondamentales, pour que dans ces conditions les variations de flux soient marquées, son circuit magnétique doit être largement ouvert.

La bobine de Ruhmkorff comporte (fig. 163) un noyau droit formé de fils de fer vernis réunis en faisceau, sur lequel sont enroulées la bobine primaire en une seule couche ou un nombre restreint de couches de gros fil, puis la bobine secondaire en un grand nombre de couches de fil fin. La bobine primaire est en rapport, par l'intermédiaire d'un interrupteur I, avec une pile P et un mécanisme trembleur destiné à couper périodiquement le circuit et composé d'une armature *a* en fer doux, montée sur ressort, venant au repos appuyer sur un buttoir *b*. Le buttoir et l'armature sont réunis par un petit condensateur C.

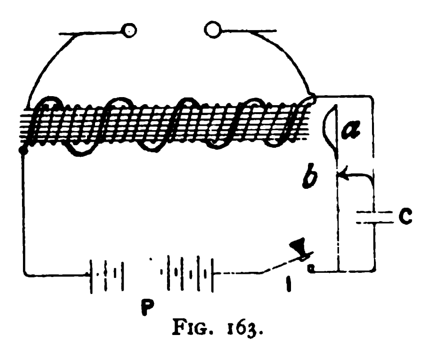


FIG. 163.

Lorsqu'on ferme le circuit primaire, le noyau est aimanté; il attire l'armature qui se déplace et interrompt le courant. Celui-ci ayant cessé, le flux magnétique se dissipe en majeure partie (flux maximum — flux rémanent) l'attraction disparaît presque complètement, l'armature sollicitée par le ressort vient reprendre sa position primitive, ce qui rétablit le courant, et ainsi de suite. Le condensateur C a pour objet de réduire l'étincelle de rupture jaillissant entre l'armature et son contact, de manière à éviter leur détérioration rapide.

On arrive donc à faire traverser le circuit secondaire par des flux magnétiques rapidement variables, successivement croissants et décroissants, d'où production de forces électromotrices à tension d'autant plus élevée, que les flux sont plus intenses, varient plus rapidement et que le rapport des spires des deux enroulements est plus grand.

Il est à remarquer que la tension secondaire est loin d'être exactement sinusoïdale. En effet, au moment de la fermeture du circuit primaire, le courant ne s'établit que lentement, à cause de la grande selfinductance de la bobine; puis, à la rupture, il cesse brusquement (courbe inférieure dentelée, fig. 164). En vertu de la loi générale de l'induction, il en résultera dans le secondaire une onde négative par exemple, de longue durée et faible amplitude, suivie d'une onde positive de faible durée et de grande amplitude (courbe supérieure). En tous cas, les fréquences sont les mêmes dans les deux circuits.

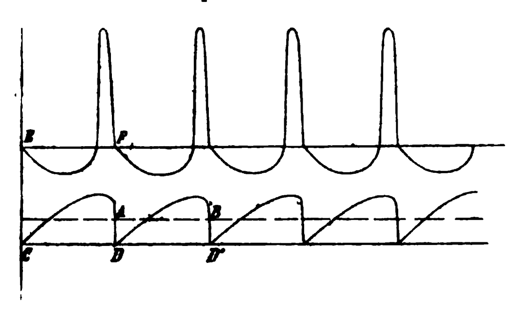


Fig. 164.

Interrupteurs. — *a*) **Mécaniques.** — Le bon fonctionnement de la bobine dépend de l'excellence de son interrupteur. On en a imaginé une foule de dispositifs. Souvent, les interruptions du courant primaire sont produites par une petite machine spéciale qui plonge puis retire rapidement une aiguille d'une coupe de mercure, ce dernier et l'aiguille faisant partie du circuit. Pour empêcher la production de vapeurs mercurielles, on recouvre le métal d'une couche de liquide : eau, alcool, etc.

b) **Électrolytiques.** — Système Wehnelt. — M. Wehnelt a fait connaître, il y a quelques années, un interrupteur remarquablement simple. Il consiste en un vase de verre (fig. 165) rempli d'acide sulfurique dilué, contenant deux électrodes *a* et *c*. La cathode *c* peut être en un métal quelconque. Généralement, c'est une plaque de plomb. L'anode *a* est formée d'un fil de platine soudé

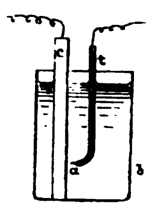


Fig. 165.

dans un tube en verre *t* rempli de mercure, au dehors duquel il ne fait saillie que de quelques millimètres.

L'installation se fait suivant la figure 166, dans laquelle I est la bobine d'induction et E une batterie d'accumulateurs d'environ 80 volts. Le condensateur *c* n'est pas nécessaire.

Quand on ferme le circuit, on constate que le courant est interrompu très nettement de 200 à 1 500 et même 1 700 fois par seconde, suivant la tension appliquée, la température du bain, etc. Le phénomène paraît pouvoir être expliqué de la manière suivante : Sous l'effet du passage du courant, la pointe de platine s'échauffe, vaporise l'eau environnante d'où isolement de l'anode et rupture du courant; la vapeur formée se dégage ou se condense, l'eau revient en contact avec l'anode qui s'échauffe de nouveau et ainsi de suite.

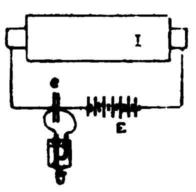


FIG. 166.

SYSTÈME CALDWELL. — Un récipient isolant est divisé en deux parties par une cloison également isolante percée d'un petit trou et contenant un liquide conducteur dans lequel plongent deux électrodes de part et d'autre de la cloison. La petitesse du trou donne à la colonne liquide intermédiaire une grande résistance qui provoque un effet Joule local intense. L'élévation de température est suffisante pour produire une bulle de vapeur qui obture le trou et interrompt le courant. Puis la bulle se dégage, le courant se rétablit, et ainsi de suite. L'appareil fonctionne sous 20 volts et la fréquence croît avec le voltage appliqué.

Quel que soit l'interrupteur employé, ce sont les brusques différences de tension créées entre les bornes secondaires que l'on utilise, notamment dans la télégraphie sans fil et pour la production des rayons Roentgen, applications qui, dans ces dernières années, ont fortement remis en honneur la bobine de Ruhmkorff, jusque-là confinée dans les laboratoires de physique.

Transformation des courants diphasés en triphasés. — Système Scott. — Sur les deux noyaux d'un transformateur diphasé (enroulements primaires DD, fig. 167), on enroule deux bobines secondaires dont l'une est reliée au milieu de l'autre, en C. Cherchons la condition pour obtenir des courants triphasés entre les bornes B_1, B_2, B_3. D'un point O correspondant au centre C de l'étoile, traçons (fig. 168) deux vecteurs rectangulaires. Portons une longueur Ob_1 proportionnelle à la force électromotrice efficace engendrée

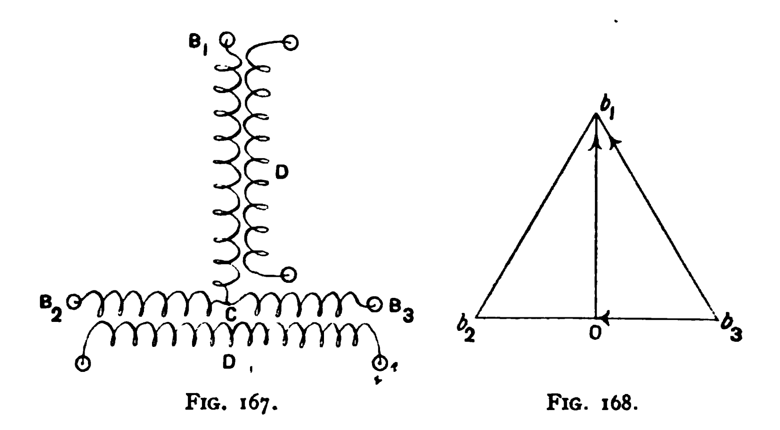


Fig. 167. Fig. 168.

dans la bobine CB_1 et en Ob_3 et Ob_2, deux longueurs égales à la moitié de la force électromotrice efficace engendrée dans la bobine B_2B_3. La force électromotrice efficace régnant entre les bornes B_1, B_2; B_2, B_3; B_3, B_1, sera représentée par les grandeurs b_1b_2, b_2b_3 et b_3b_1. Pour que les courants soient triphasés, il faut que ces droites soient égales, ou le triangle $b_1b_2b_3$ équilatéral. Dans ces conditions,

$$Ob_2 = Ob_3 = Ob_1 \operatorname{tg} 30° = \frac{Ob_1}{\sqrt{3}}.$$

Comme le nombre de spires des bobines est proportionnel aux forces électromotrices développées, on voit que le nombre de spires de la bobine $CB_1 = \sqrt{3}n$, en appelant n celui des

demi-bobines CB_2 et CB_3. Les forces électromotrices efficaces obtenues seront d'ailleurs proportionnelles à

$$b_1b_2 = b_1b_3 = b_2b_3 = Ob_2 + Ob_3 = n.$$

§ 2. — COURANTS ALTERNATIFS EN CONTINUS ET RÉCIPROQUEMENT.

Les appareils effectuant ces transformations comportent toujours des organes mobiles.

Moteur-générateur. — L'intermédiaire mis à contribution est l'énergie mécanique. Un moteur actionne directement un générateur fournissant le courant sous la forme désirée; solution simple et très sure.

Commutatrice ou convertisseur. — La commutatrice concentre sur son induit les deux enroulements des doubles appareils précédents et les réunit même souvent en un seul.

Nous avons vu que l'on peut faire débiter n'importe quelle espèce de courant à un induit Gramme en raccordant des points convenablement choisis de son bobinage, à des bagues isolées sur lesquelles frottent des balais. Par exemple, en connectant à trois bagues isolées, trois points distants de $\frac{2\pi}{3}$, on obtient des courants triphasés aux bagues.

Si on alimente l'induit au moyen de courants de cette nature, il fonctionnera comme moteur synchrone polyphasé, et l'on pourra recueillir à son collecteur du courant continu, et vice versa.

Le convertisseur est habituellement utilisé, de même d'ailleurs que l'appareil précédent, pour transformer des courants polyphasés en continus de tension moindre.

Permutatrice. — La partie tournante peut même être réduite à un collecteur et alors les balais sont fixes, ou à des balais tournants et le collecteur est fixe. Considérons un transformateur triphasé dont les trois bobines secondaires

sont chacune subdivisées en *n* sections indépendantes. Raccordons ensemble trois à trois les diverses bobines des trois circuits secondaires, montons ces *n* groupes de trois bobines en tension, en reliant les groupes successifs à des balais frottant sur des bagues isolées. Le circuit est fermé entre la première et la dernière bobine, ce qui ne présente aucun inconvénient, puisqu'il s'agit de quantités polyphasées dont la somme est nulle à chaque instant. Si les nombres de spires des groupes ont été convenablement choisis, les forces électromotrices développées successivement aux bouts des fractions $\frac{T}{n}$, $2\frac{T}{n}$, $3\frac{T}{n}$, ... de la période sont égales. Les *n* bagues isolées sont raccordées aux lames d'un collecteur entraîné par un petit moteur synchrone tournant à la vitesse de pulsation des courants triphasés. Deux balais fixes frottant sur le collecteur recueilleront un courant continu d'autant plus constant, que le nombre des sections sera plus grand.

A cette catégorie d'appareils appartiennent les transformateurs de MM. Leblanc et Hutin, baptisés naguère du nom fantaisiste (que l'on abandonne aujourd'hui) de « panchahuteurs ».

§ 3. — COURANT CONTINU EN CONTINU.

Les appareils de cette classe appartiennent tous au type moteur-générateur.

Survolteur. — DYNAMO SÉRIE. — Un moteur en dérivation actionne une dynamo série que l'on fait traverser par le courant à survolter. Quand celui-ci augmente d'intensité, ce qui majore la chute de voltage dans les circuits, la force électromotrice de la dynamo série augmente également, de manière à compenser la réduction produite.

DYNAMO COMPOUND. — Lorsqu'une batterie d'accumulateurs est mise en quantité avec des génératrices sur un circuit d'utilisation, elle ne se charge que moyennant une notable augmentation du voltage de ces dernières et ne se décharge que pour autant que leur tension baisse considérablement.

On peut resserrer beaucoup ces limites, en faisant actionner par un moteur, une dynamo compound dont l'enroulement dérivé et l'induit sont raccordés aux bornes de la batterie d'accumulateurs, mais dont l'enroulement série, enroulé en sens inverse du premier, se trouve parcouru par le courant du circuit d'utilisation.

Dès lors, quand ce dernier ne consomme pas de courant, l'enroulement différentiel n'ayant pas d'effet, le voltage de la dynamo est élevé, la batterie se charge et les génératrices de la centrale ne marchent pas à vide. Au contraire, si le circuit d'utilisation prend du courant, le voltage de la dynamo baisse, et dès qu'une certaine proportion est atteinte, la batterie venant en aide aux génératrices centrales se décharge sur le circuit. Le travail des machines de la station génératrice se trouve ainsi régularisé, malgré de grandes variations de demande dans la consommation.

CHAPITRE XIV

LES CANALISATIONS ÉLECTRIQUES

§ 1. — GÉNÉRALITÉS. CHOIX DU CONDUCTEUR. CIRCUITS AÉRIENS.

Généralités. — Sauf dans la télégraphie sans fil, qui constitue un cas particulier de la télégraphie ordinaire, les générateurs électriques sont reliés aux récepteurs, au moyen de canalisations aériennes ou souterraines. Les premières comportent des conducteurs fixés sur des supports en bois ou en fer par l'intermédiaire d'isolateurs. Les secondes présentent des conducteurs fixés ou élongés dans des caniveaux ou dans les égouts, ou simplements enfouis dans le sol.

Lorsqu'il s'agit de courants faibles, un seul conducteur peut être posé et l'on se sert souvent, en guise de second conducteur, de canalisations comme celles d'eau ou de gaz (celle-ci moins bonne à cause des joints garnis de mastic plus ou moins isolant) ou de la terre elle-même. On met cette dernière à contribution, au moyen de plaques conductrices enfouies dans le sol humide. Une bonne terre ne mesure que quelques ohms de résistance. L'emploi de la terre est formellement prohibé dans le cas de courants intenses, en raison des dangers d'incendie et d'électrolyse qu'il présente, la conductibilité des canalisations étrangères ainsi empruntées ne pouvant être assurée avec suffisamment de sécurité.

Choix du conducteur. — La résistance d'un conducteur de longueur l, de résistivité ρ et de section s est

$$R = \frac{\rho l}{s}. \qquad (1)$$

Son poids est $P = sl\delta$ en désignant par δ son poids spécifique, et son prix

$$P_1 = Pp = sl\delta p \qquad (2)$$

en appelant p le prix spécifique. Remplaçons s par sa valeur tirée de (1), il vient

$$P_1 = \frac{\rho l^2 \delta p}{R}. \qquad (3)$$

Si nous employons un autre conducteur pour constituer le circuit et lui donnons une section telle que sa résistance totale soit la même, son prix

$$P'_1 = \frac{\rho' l^2 \delta' p'}{R}.$$

Pour que $P_1 = P'_1$, il faut que

$$\rho\delta p = \rho'\delta' p' \quad \text{ou} \quad \frac{p}{p'} = \frac{\rho'\delta'}{\rho\delta},$$

c'est-à-dire que les prix spécifiques doivent être en raison inverse du produit des résistances et poids spécifiques.

Formons ce produit pour les principaux métaux utilisés dans les canalisations industrielles.

NATURE du métal.	ρ en microhms à 0° C.	δ	$\rho\delta$
Fer.	10	7,8	78
Aluminium. .	2,9	2,6	7,54
Cuivre	1,6	8,9	14,24

On en conclut qu'au point de vue du coût, le fer et l'aluminium l'emportent sur le cuivre, dès que leurs prix sont respectivement inférieurs à $\frac{1}{5,5}$ et 1,89 fois celui de ce dernier. Mais le prix d'achat, s'il constitue un élément très important du problème, n'en représente qu'une face.

Il y a encore lieu de tenir compte de divers autres facteurs importants et notamment de la résistance aux influences atmosphériques, de la stabilité mécanique de la ligne, etc.

Fer. — Le fer est tenace (charge de rupture 43 kg par millimètre carré) et peu coûteux. Mais il se détériore rapidement. Même galvanisé, on ne peut guère compter, sous nos climats, sur une durée de plus de quinze ans. En outre, il est très pondéreux relativement à sa conductibilité, ce qui majore le coût du transport et de la pose. Dès lors, si l'on fait entrer en ligne de compte les frais d'intérêt et d'amortissement, on trouve qu'il revient plus cher que le cuivre. Il a d'ailleurs le vice grave de posséder, en raison de sa grande perméabilité, un coefficient de selfinduction élevé, qui le rend inapte à entrer dans la constitution des longs circuits parcourus par des courants alternatifs. Son emploi, limité aux courants faibles, se restreint de plus en plus.

Aluminium (*). — On avait fondé sur lui les plus belles espérances, en raison de sa grande légèreté jointe à une conductance élevée et une résistance mécanique suffisante (20,3 kg par millimètre carré). Malheureusement, il est loin d'être inattaquable par les agents atmosphériques comme on l'avait cru tout d'abord, et son grand coefficient de dilatation facilite le mélange des fils de mince diamètre, quand la température s'élève. En outre, il présente des difficultés de soudage.

Pour ces motifs, l'emploi de l'aluminium se confine jusqu'ici aux longues lignes de peu de conducteurs de gros diamètres, établies dans des pays dont l'atmosphère est pure et sèche. Il est probable cependant qu'on arrivera à l'utiliser sous forme d'alliages améliorant ses qualités.

Cuivre et dérivés. — Le métal par excellence pour les usages électriques est le cuivre. Sa conductibilité est très élevée; il résiste parfaitement aux intempéries, en se recouvrant d'une patine d'oxyde stable et inerte, qui protège le métal sous-jacent contre toute attaque ultérieure. Dans des

---

(*) Massin, *Conducteurs téléphoniques en aluminium*. (Annales télégraphiques, 1899, p. 200.)

conditions ordinaires, on peut compter sur une durée d'au moins trente ans. Après sa mise hors d'usage, il vaut encore environ le tiers de son prix d'achat (1 franc par kg). Sa grande valeur tente les voleurs ; aussi, les lignes doivent être surveillées, particulièrement aux environs des grandes villes.

On pare à la résistance mécanique relativement peu élevée du cuivre pur (28 kg par millimètre carré) en le traitant par le phosphore ou de silicium. On obtient ainsi des bronzes phosphoreux ou silicieux de diverses conductibilités et résistances mécaniques, ces deux facteurs marchant en sens inverse l'un de l'autre. Par exemple, le bronze Montefiore à 97 % de conductibilité résiste à 45 kg par millimètre carré, celui à 30 % ne rompt que sous une charge de 123 kg par millimètre carré. L'industrie fournit aussi des fils compounds ou bimétalliques, constitués d'une âme d'acier recouverte de cuivre doux, dont les propriétés sont analogues à celles des bronzes.

Le diamètre des conducteurs des lignes aériennes ne dépasse pas 8 à 9 millimètres, exceptionnellement 10 à 11. Au delà de ces dimensions, la pose devient impossible et il faut recourir aux conducteurs cordés.

Tension à donner au fil. — Le fil doit être fixé de manière à pouvoir résister, quelles que soient les conditions atmosphériques. La tension à lui donner variera donc suivant sa nature, sa section, la température au moment de la pose, la portée.

La courbe que prend un brin élastique tendu librement entre deux points d'appui est une chaînette. On simplifie notablement les formules, tout en leur laissant une exactitude suffisante pour la pratique, en assimilant la chaînette à une parabole. On obtient dès lors pour la longueur d'un fil pesant p kg par unité de longueur, tendu à T kg sur une portée (distance horizontale des points d'appui) de a mètres l'équation

$$l = a + \frac{a^3 p^2}{24\,T^2}. \qquad (1)$$

Lorsque la température s'abaisse de t°, le fil se contracte et sa longueur devient

$$l' = l(1 - \alpha t). \qquad (2)$$

Mais la contraction augmente la tension qui devient T', et de l'excès de tension T' — T résulte un allongement. La longueur l' se modifie conséquemment et prend la valeur :

$$l'' = l'\left[1 + \frac{e}{s}(T' - T)\right],$$

e étant l'allongement que prend un fil du métal dont il s'agit, de 1 millimètre carré de section et de 1 mètre de longueur, sous l'effort de 1 kilogramme, et s sa section, exprimée en millimètres carrés.

Pour simplifier l'équation, posons, avec M. Cloeren (*), $\frac{e}{s} = e'$, qui représentera donc l'allongement de 1 mètre du fil considéré sous l'effort de 1 kilogramme dans les limites de l'élasticité,

$$l'' = l'[1 + e'(T' - T)]. \qquad (3)$$

Nous avons alors une nouvelle chaînette dont les facteurs a, p, l'', T' sont liés par l'équation générale (1)

$$l'' = a + \frac{a^3p^2}{24T'^2}. \qquad (4)$$

En éliminant l, l' et l'' entre les quatre équations ci-dessus, on obtient une équation du 3e degré en T' fort compliquée, mais se résolvant aisément au moyen de la règle à calculs (**). p, α, e' sont en effet connus pour le fil dont on fait usage; on se donne a, et T représente la tension normale à donner pour une température moyenne. t est la différence entre cette température moyenne et celle pour laquelle on veut calculer la tension. t est positif ou négatif, selon que la température

(*) Cloeren, *Conditions d'équilibre d'un fil de bronze phosphoreux tendu entre deux appuis*. (Bull. de la Soc. belge d'électriciens, janvier 1888.)

(**) *Méthode Cloeren-Bour pour la résolution générale des équations du 3e degré au moyen de la règle à calculs.*

est inférieure ou supérieure à la température normale adoptée. En fixant cette dernière à 18° et estimant que T doit alors être au plus égale au quart de la charge de rupture totale, M. Cloeren a calculé des tableaux qui contiennent toutes les données utiles relatives aux fils de bronzes les plus employés (°).

Rappelons que les formules donnant la tension en kg et la flèche f en mètres, en fonction de la portée exprimée en mètres également, sont les suivantes :

$$T = \frac{pa^2}{8f}; \qquad f = \sqrt{\frac{3a(l-a)}{8}}.$$

Emploi du dynamomètre. — La tension donnée au fil se mesure au dynamomètre. Celui-ci se compose d'une tige terminée d'un côté par un crochet, de l'autre par un plateau coulissant dans une enveloppe cylindrique en comprimant un fort ressort à boudin. Un index fixé sur la tige se déplace le long d'une graduation déterminée empiriquement.

Pince à tirer. — On exerce l'effort de traction nécessaire pour amener le fil à la tension voulue, par l'intermédiaire de pinces à tirer dont la figure 169 donne la vue d'un spécimen.

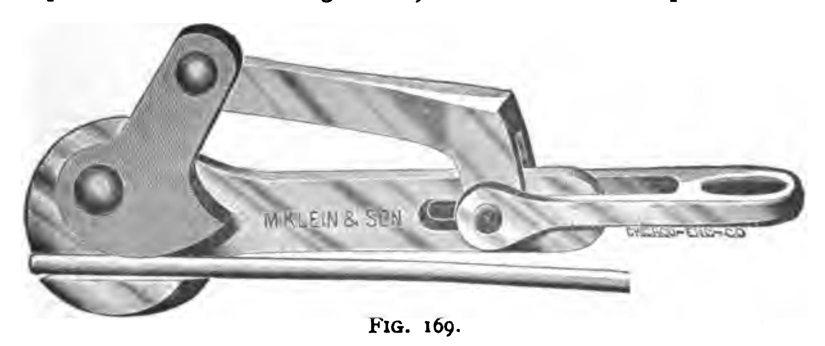


FIG. 169.

Elles se composent en général de deux mâchoires dont l'une est fixe et dont l'autre, pourvue d'un levier, tourne

(°) On les trouvera dans notre livre : *La téléphonie*, pp. 152 et suiv.

excentriquement autour d'un axe. Une bielle actionnant le levier par un tirant ou un ressort, provoque le coïncement du fil entre deux mâchoires qui sont légèrement dentelées pour éviter tout glissement.

Joints. — Le fil est fourni en rouleaux qu'il faut réunir l'un à l'autre. Cette liaison est d'une grande importance et ne laisse pas de présenter quelque difficulté. Un joint doit, en effet, offrir une résistance à la traction et une conductibilité au moins égales à celles du brin lui-même.

Au point de vue de la résistance mécanique, il est prudent de ne pas admettre les dispositifs dans lesquels le métal résistant à la traction est tordu, car la torsion réduit considérablement sa ténacité. Cette réduction peut atteindre 33,5 % pour les fils de 1,4 millimètre.

La conductibilité du joint est assurée par la soudure. La présence de celle-ci implique le chauffage du fil. Or un métal chauffé trop fortement se recuit et perd la ténacité acquise par l'écrouissage. On utilisera donc une soudure fluide contenant en poids au moins deux d'étain pour un de plomb, et l'on soude à la colophane.

Joint Theys. — Jusqu'au diamètre de 2 millimètres inclus, on peut faire usage du joint Theys, remarquable par sa simplicité.

Les deux fils à réunir sont juxtaposés (fig. 170); on enroule ensuite sur chacun d'eux l'extrémité de l'autre suivant deux spires et l'on soude les parties jointives de manière que la soudure vienne se loger et se maintienne par capillarité entre les deux fils, avant de se prendre.

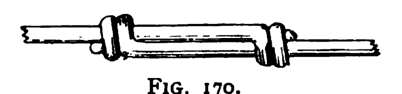


Fig. 170.

Au delà du diamètre de 2 millimètres, ce joint ne résiste plus autant que le fil, la couche tangentielle de soudure qui subit tout l'effort devenant insuffisante.

Manchon Baron. — Il est surtout employé en France. Le manchon Baron (fig. 171) est un petit tube aplati, en bronze, dans lequel les conducteurs à réunir entrent à frottement doux.

On décape le manchon et les fils avec un petit pinceau trempé dans du chlorure de zinc dont la neutralité est assurée par la présence d'un morceau de zinc dans le liquide. Le manchon est chauffé avec un fer à souder; on fait couler vivement la soudure, de manière qu'elle le remplisse bien; enfin, on laisse refroidir lentement le manchon et le lave à l'éponge pour enlever le chlorure de zinc.

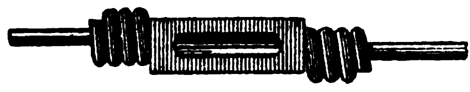


Fig. 171.

Comme la figure l'indique, chaque brin est enroulé sur l'autre de quelques spires, contre les côtés extrêmes du manchon, ceci pour le fil de 3 millimètres et au-dessous. Ces spires ne sont pas nécessaires. Le fil d'un diamètre supérieur est spécialement recourbé dans les encoches que présente une des faces du manchon.

Joint Britannia. — Pour façonner le joint Britannia (fig. 172), on juxtapose les deux fils sur la longueur nécessaire et on les réunit par 25 ou 30 spires serrées, d'un fil de cuivre étamé de plus faible diamètre. Il faut avoir soin de saupoudrer légèrement de colophane les extrémités à réunir, avant d'enrouler le fil de ligature, afin de faciliter la prise de la soudure entre les fils de ligne. On pourra admettre pour des conducteurs de 5 millimètres du fil étamé de 1,5 à 2 millimètres et pour les conducteurs plus minces du 1 à 1,5.

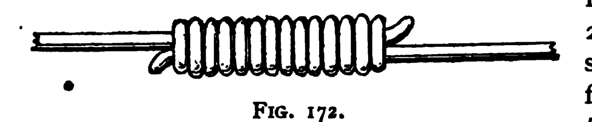


Fig. 172.

Isolateurs. — Les fils conducteurs se fixent par l'intermédiaire d'isolateurs fabriqués généralement en porcelaine vitrifiée et émaillée. La résistivité de cette substance atteint 5421.10^{12} mégohms à 0°. L'isolation qu'elle procure serait toujours amplement suffisante quelle que soit sa forme, si la ligne était toujours maintenue sèche.

ROULETTES. — De fait, les premiers isolateurs comportaient de simples roulettes (fig. 173) se fixant au moyen de vis.



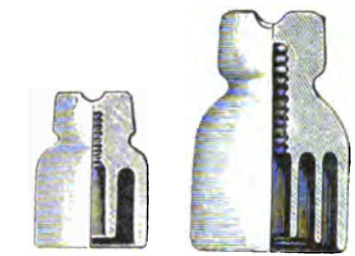



FIG. 173. FIG. 174. FIG. 175. FIG. 176.

Mais par temps de pluie ou simplement de brouillard, ces supports se recouvrent d'humidité et l'isolement devient illusoire, l'eau étant conductrice.

ISOLATEURS A CLOCHES. — Pour assurer le maintien de l'isolement, on a imaginé de donner à l'isolateur la forme d'une cloche et l'on obtient l'isolateur à simple cloche (fig. 174), dont la partie centrale évidée et filetée, sert à sa fixation. L'isolement est ainsi beaucoup mieux assuré, l'électricité ne pouvant s'écouler par le support, parce que la cloche intérieure reste sèche et propre si sa profondeur est suffisante.

On obtient des résultats encore plus nets au moyen de l'isolateur à double cloche (fig. 175) et, pour les tensions élevées, de l'isolateur à triple cloche (fig. 176).



FIG. 177.

ISOLATEURS A L'HUILE. — Particulièrement dès le début de l'emploi des hautes tensions, on a utilisé des isolateurs dont la cloche, se repliant sous forme de godet, permet de remplir celui-ci d'huile (fig. 177).

Parfois aussi, on les façonne en deux pièces dont la partie supérieure présente une ou plusieurs cloisons venant plonger dans le ou les godets remplis d'huile de la partie inférieure.

Ces supports sont coûteux et exigent un grand entretien, le liquide isolant qu'ils contiennent finissant par s'épaissir et se recouvrir de poussières plus ou moins conductrices. La tendance actuelle est de les abandonner pour les isolateurs à cloches multiples, dont le nombre s'élève parfois à quatre, pour les très hautes tensions.

Attache du fil sur l'isolateur. — Le conducteur est généralement fixé invariablement sur chaque isolateur. Voici le mode d'attache du fil de bronze, adopté par l'Administration des Télégraphes belges. Le conducteur est recouvert (fig. 178), sur la partie qui vient dans le col de l'isolateur, de spires serrées du fil de ligature, lequel est généralement d'un diamètre un peu plus faible et en cuivre mou. Chaque bout fait ensuite en sens inverse le tour de l'isolateur et est enroulé de nouveau sur le fil de ligne en BA et CD en s'éloignant du support, puis en revenant vers lui en une seconde couche de fil.

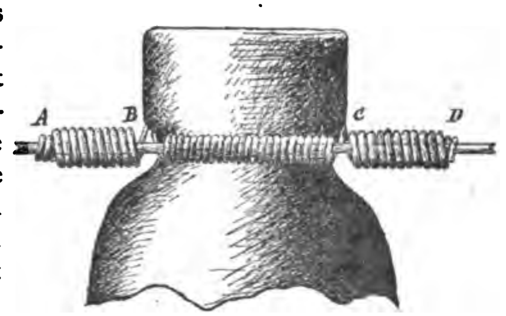


Fig. 178.

Les isolateurs se fixent sur des ferrures ou des consoles galvanisées soit au moyen de chanvre, soit au moyen de plâtre, ce qui donne un assemblage plus rigide. Dans le premier cas, ils sont filetés intérieurement et, dans le second simplement striés.

Ferrures. — Les ferrures sont droites ou courbes et

terminées par une queue filetée (fig. 179) si elles doivent être implantées dans des matériaux ligneux; en queue d'haronde si on les plâtre dans les interstices des murailles. L'axe de la partie AB doit passer par le col de l'isolateur, afin que la traction exercée par le fil n'ait pas une tendance à faire tourner la ferrure en cas de bris d'une des portées.

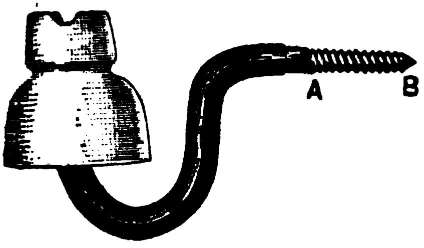


Fig. 179.

Les consoles droites, verticales, s'attachant sur des traverses métalliques, portent un bourrelet suivi d'une partie filetée qui sert à les fixer au moyen d'un écrou (fig. 177).

Pour économiser la place, on emploie souvent des ferrures à 2, 4 ou 6 et même 8 fils. Tous ces supports en fer doivent être soigneusement galvanisés. Il est utile de remplacer les rivures de ces pièces par des assemblages par boulons beaucoup plus solides et durables.

Sourdines. — Les vibrations que le vent imprime aux fils, se propagent par l'intermédiaire des appuis dans les constructions, où elles donnent lieu à un bourdonnement strident extrêmement désagréable. On l'évite en pinçant les conducteurs ou les munissant de masses à grande inertie aux ventres de vibration voisins des isolateurs, ou en absorbant les vibrations par l'interposition de matières élastiques entre le fil et le point d'appui.

La sourdine généralement employée en Belgique est constituée comme suit : on serre le col de l'isolateur dans un fort anneau en caoutchouc de 5 millimètres d'épaisseur et de 20 de hauteur. On applique par-dessus une mince feuille de plomb sur laquelle vient se fixer le fil. On peut la compléter, s'il est nécessaire, par un fil de plomb enroulé autour de chaque brin de part et d'autre de l'isolateur, sur une longueur de 30 centimètres environ. Pour éviter qu'en

cas de rupture il ne glisse vers le milieu de la portée, on peut enrouler le fil de plomb sur un tube en caoutchouc fendu longitudinalement et passé sur le conducteur. Dans ce cas, on supprime la feuille de plomb.

Poteaux en bois. — Les supports sont généralement en bois dans les lignes sur routes. On emploie à cet effet des sapins, pins ou mélèzes bien droits et on leur fait subir une préparation qui a pour but de leur permettre de résister à l'humidité et à l'attaque des parasites, insectes et champignons. On les imprégnait jadis dans notre pays de $CuSo^4$. Mais celui-ci exige des bois verts; il attaque les ferrements des isolateurs et disparaît à la longue sous les lavages répétés des eaux pluviales. Par sa présence, la vie du poteau, qui ne serait sous nos climats que de cinq à six ans, est portée à environ dix ans. On double au moins cette durée par le créosotage, qui a en outre l'avantage de pouvoir se pratiquer sur les bois secs. On injecte 250 litres par mètre cube de bois.

Les poteaux s'emploient généralement sous les longueurs de 6,5; 7,5; 9; 10,5; 12; 14; 17 et 20 mètres. La base des trois derniers s'implante de 2 mètres dans le sol, celle des autres de 1,5 mètre.

En ligne droite et pour la pose de quelques conducteurs minces ($<$ de 5 millimètres) dont les isolateurs sont espacés verticalement de 30 centimètres, on emploie neuf à douze poteaux par kilomètre. Leur hauteur varie avec le nombre des conducteurs, le profil du terrain et les obstacles à franchir.

Supériorité des longues portées. — Il est à remarquer que les portées sont d'autant plus stables qu'elles sont plus longues, comme on peut s'en assurer en consultant les tableaux donnant les portées, tensions et flèches des fils de bronze. Par exemple, pour le fil de 3 millimètres à 95 °/₀ de conductibilité, on constate que de $+ 40$ à $- 10°$ la tension dans une portée de 50 mètres varie de 54,8 à 119,9 kilogrammes ou de 65,1 kilogrammes, tandis que dans les mêmes conditions elle ne varie que de 72,1 à 96,3, soit de

24,2 kilogrammes dans une portée de 200 mètres, bien que la tension à 18° soit la même de part et d'autre.

En courbe, le nombre de points d'appui doit être augmenté; il dépend du rayon de courbure et des changements de direction. Si la courbe est prononcée, la résultante des efforts agissant sur les supports a pour effet de les faire fléchir ou de tendre à les arracher du sol. On y remédie en inclinant les poteaux dans la direction de la résultante et les consolidant au besoin par des haubans si le terrain est dur; des poussards ou jambes de force disposés de manière à résister par compression, si le terrain est meuble.

Enfin, dans le cas où les poteaux sont soumis à des efforts considérables, on les réunit soit par paires, poteaux doubles; par trois placés en pyramide, poteaux triples; par quatre, poteaux quadruples. Leurs assemblages sont consolidés par des boulons, entretoises et ligatures en fil de fer galvanisé.

Poteaux métalliques. — Soumis à des chaleurs excessives et à des pluies diluviennes dans les pays chauds, les poteaux en bois ne s'y conservent pas; aussi a-t-on dû recourir aux poteaux métalliques. Dans les colonies françaises, notamment (*), on s'est arrêté aux fers en simple T dont les dimensions le plus couramment employées sont $10 \times 6 \times 0,8$; $10 \times 8 \times 0,9$; $10 \times 11,5 \times 1$ centimètres. Les ferrures viennent se boulonner sur les faces des ailes du T. Ces supports sont encastrés dans un parallélipipède en béton de 1 mètre de haut sur 25 centimètres de côté, coulé sur place. Le logement destiné au poteau est obtenu par l'emploi d'une forme en bois ayant les dimensions de celui-ci, et placée dans le moule quand on coule le béton.

Dans les grandes villes où le nombre des fils s'exagère et où il s'agit de supporter leurs nappes à grande hauteur, on est également obligé d'établir des poteaux métalliques généralement constitués de fers cornières entretoisés par des fers

(*) Dubreuil, *Lignes sur appuis métalliques en Extrême-Orient.* (Annales télégraphiques, 1895, p. 385.)

cornières également ou plats, solidement encastrés dans un massif de béton.

L'emploi des poteaux métalliques, d'ailleurs très coûteux, n'est pas toujours possible. On recourt alors aux chevalets posés sur les toitures. Ils sont composés de fermes en fers cornières supportant les traverses, porte-isolateurs et consolidées par des entretoises. On les haubanne si besoin.

Introduction des fils. — Pour le raccordement des fils aériens avec les conducteurs posés à l'intérieur des habitations, on emploie des tubes isolants en porcelaine ou en ébonite (fig. 180) dont l'ouverture extérieure est tournée vers le bas, dans le but d'éviter l'introduction de l'eau. La partie AB est striée, afin de mieux assurer sa fixation dans la muraille.

Si les conducteurs sont à bas potentiel, on se contente souvent de les introduire par une ouverture pratiquée dans la boiserie des fenêtres, en ayant soin de leur faire suivre un

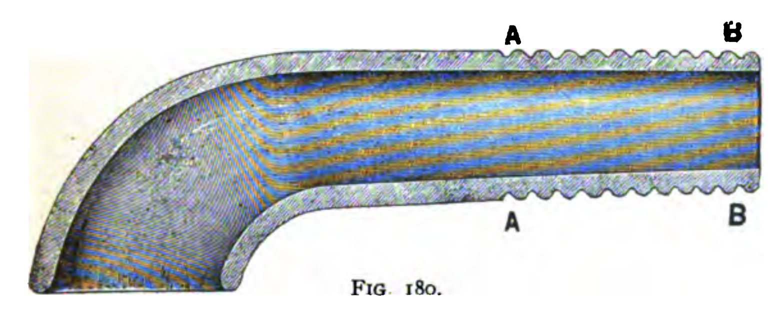


FIG. 180.

parcours dont le tracé présente sa convexité vers le bas, pour s'opposer aux infiltrations. Ils sont, bien entendu, dans ce cas, recouverts d'un isolant depuis le dernier isolateur.

§ 2. — CONDUCTEURS RECOUVERTS.

Nature et forme du conducteur. — CUIVRE. — La résistance mécanique n'étant ici pour ainsi dire pas mise à contribution, c'est le cuivre pur qui est exclusivement employé.

CONDUCTEURS CORDÉS. — Au delà d'un certain diamètre, on

obtient la section nécessaire au moyen de fils cordés, afin de laisser au conducteur une souplesse suffisante pour être manié sans trop de difficulté et céder aisément aux dilatations provoquées par les variations de température. Cette ramification est également favorable à la dissipation de la chaleur produite par effet Joule, et permet d'atteindre des densités de courant supérieures à celles tolérées dans les sections massives. La jonction des divers tronçons de circuit doit se faire par *soudage*, sauf quand ils présentent de larges surfaces étamées que l'on peut serrer énergiquement au moyen de vis.

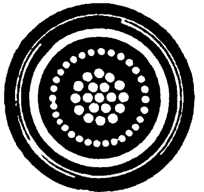


Fig. 181.

Conducteurs concentriques. — Enfin, on distribue parfois les fils élémentaires d'un circuit suivant des circonférences concentriques (fig. 181).

Isolants. — Caoutchouc. — Un des principaux isolants utilisés pour recouvrir les conducteurs est le caoutchouc, gomme provenant du latex de plantes qui se rencontrent sous les tropiques. A l'état pur, il se décompose aisément sous la seule action des agents atmosphériques. On évite cette altération en le vulcanisant, c'est-à-dire en y incorporant du soufre soit à chaud, soit à froid. Jusque 100° C, le caoutchouc vulcanisé accuse une dureté et une élasticité presque uniformes. Il résiste à un haut degré aux agents chimiques et aux dissolvants. Le soufre altérant le cuivre, il est nécessaise d'étamer celui-ci ou de le recouvrir d'abord d'une couche de caoutchouc naturel. La porosité du caoutchouc ne permet pas de l'employer sous l'eau, surtout sous pression, à grande profondeur.

Gutta-percha. — La gutta-percha est également une gomme végétale qui, au point de vue de la conservation, possède des propriétés inverses au caoutchouc. A l'air, en effet, elle se résinifie, se dessèche et tombe en poussière, tandis qu'elle isole parfaitement et se conserve indéfiniment sous l'eau. Elle commence à se ramollir vers 37° C. Comme elle n'adhère pas au cuivre, on recouvre d'abord celui-ci d'un

ciment appelé « composition Chatterton », qui contient en poids 3 de gutta, 1 de résine et 1 de goudron de bois.

Le prix des deux substances, dont nous venons de nous occuper, étant élevé et ayant une tendance à monter encore par suite d'une exploitation irrationnelle des forêts où se rencontrent les arbres qui les produisent, on a cherché à leur donner des succédanés, dont le papier représente le prototype.

Papier. — On utilise le papier fort, tel que celui obtenu du chanvre de Manille, imprégné ou non. Il est enroulé mécaniquement en bandelettes autour du conducteur en cuivre, jusqu'à obtension de l'épaisseur voulue. Un tuyau protecteur en plomb étiré à température peu élevée le soustrait à l'humidité. Le papier s'emploie même pour les hauts voltages; il est moins coûteux et plus stable que les gommes.

Canalisations extérieures. — 1. Cables aériens. — Quand la place manque pour la pose des fils aériens, on évite parfois

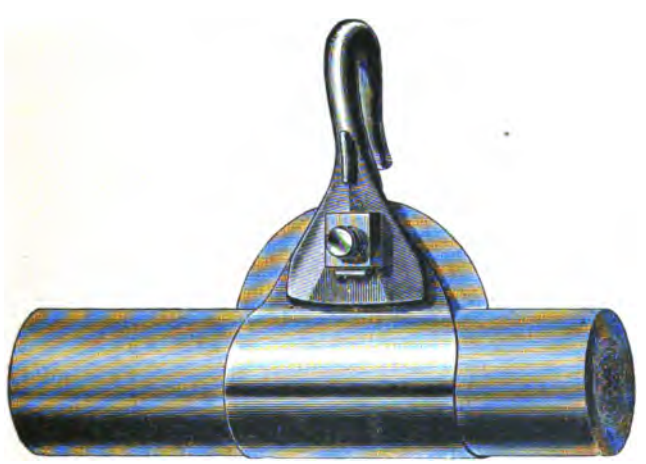


Fig. 182.

de recourir aux canalisations souterraines par l'emploi de câbles aériens. Les conducteurs élémentaires sont isolés au

caoutchouc et le toron est recouvert d'un ou de plusieurs guipages imprégnés d'enduits préservateurs à base de goudron.

On suspend le câble aérien à un câble porteur en acier galvanisé, fixé sur des isolateurs. Le câble électrique (fig. 182) s'attache au câble porteur par l'intermédiaire de crochets ou d'anneaux en porcelaine soutenus par des fils métalliques ou, plus simplement, au moyen de boucles en cuir bouilli.

2. Conducteurs nus posés en caniveaux sur isolateurs. — Les conducteurs sont nus, soutenus par des isolateurs en porcelaine ou ébonite (tramways) sur de faibles portées dans des canivaux aboutissant à des trous d'homme où se font les jonctions. Peu employé.

3. Cables tirés dans des conduites. — Un mode de pose très sûr consiste à tirer les câbles dans des conduites en fonte ou en poteries enfouies dans le sol (fig. 183) et aboutissant dans des trous d'homme. Un nombre plus ou moins grand de tuyaux sont placés côte à côte, suivant les exigences à satisfaire. L'eau de condensation ou d'infiltration est recueillie dans des puisards creusés au fond des trous d'homme.

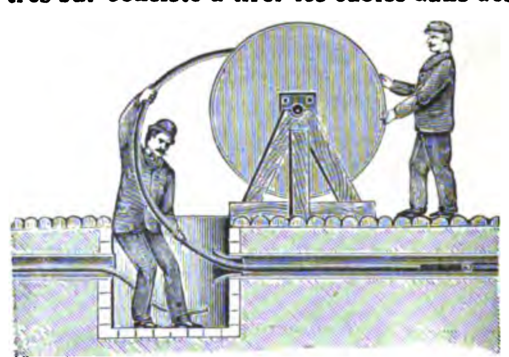


Fig. 183.

Ce genre de canalisation présente l'inconvénient suivant : les fuites de gaz s'accumulent parfois en formant des mélanges détonants qui explosent, probablement sous l'effet d'étincelles électriques.

4. Cables armés. — Enfin, on utilise beaucoup des câbles armés (fig. 184, 185) dont le toron de conducteurs isolés (enfermé dans un ou plusieurs tubes en plomb, plus particulièrement si l'isolant est du papier) se trouve revêtu d'une ou de plusieurs couches de bandes ou fils de fer jointifs,

enroulés suivant une hélice à pas plus ou moins long.

On pose ces câbles, préalablement enduits de goudron,

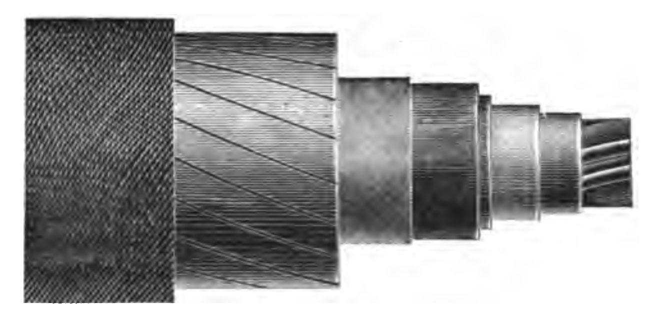


Fig. 184.

dans une couche de sable, et on les met à l'abri des coups de pioche des terrassiers, en les recouvrant d'un lit de briques ou dalles quelconques suffisamment résistantes, avant de refermer la tranchée.

Ce sont aussi les câbles armés que l'on réserve pour les applications sous-fluviales ou sous-marines.



Fig. 185.

Canalisations intérieures. — Dans les locaux secs et pour de faibles voltages (sonneries et téléphones), les conducteurs peuvent être simplement revêtus d'une matière textile imprégnée d'une substance non hygroscopique, comme la paraffine, ou, si le côté esthétique domine, mis sous soie.

On les fixe par l'intermédiaire de petits isolateurs en os, verre ou porcelaine, ou sur taquets en bois. La pose au moyen de clous ou cavaliers n'est pas recommandable, parce qu'ils détériorent les conducteurs et les murs.

Quand le voltage s'élève (éclairage électrique) ou dans des locaux humides, l'isolation au caoutchouc s'impose.

On dissimule souvent les fils sous des moulures spéciales

en bois. A cette fin, on les pose dans des rainures parallèles creusées à 1 centimètre de distance dans des lattes que l'on recouvre ensuite d'un couvercle plus ou moins ouvragé.

Les tubes Bergmann, en papier, raccordés au moyen de manchons métalliques s'emboîtant par pression, sont aussi très employés. Pour des courants faibles (section moindre que 3 millimètres carrés), on peut admettre deux conducteurs dans un seul tube. A la traversée des planchers et murs, les fils doivent être enfermés dans une gaine isolante et imperméable.

On n'admet pas, en général, de section inférieure à 1 millimètre carré, soit $d = 1,13$ millimètre, sauf dans les appareils d'éclairage, où la section peut descendre à 0,5 millimètre carré, $d = 0,8$. *(Règlement de la ville de Bruxelles.)*

Isolement des canalisations. — La résistance à l'isolement d'une canalisation est la résistance comprise entre les conducteurs de potentiels opposés. Elle se mesure souvent par la méthode de comparaison, en isolant les extrémités des câbles considérés et mettant les autres en rapport avec un galvanomètre et une pile. On observe la déviation du galvanomètre après une minute d'électrisation.

L'isolement minimum admissible est spécifié par les administrations. A Bruxelles, notamment, on a adopté la règle dite du $\frac{1}{10\,000}$: l'isolement doit être tel que les appareils étant raccordés, il ne puisse se perdre dans la résistance d'isolement plus du dix-millième du courant normal traversant la canalisation.

Si, par exemple, une canalisation alimente un appareil consommant 5 A sous 110 V, il ne pourra passer sous cette pression à travers l'isolant plus de 0.0005 A. En vertu de la loi d'Ohm, $i = \frac{e}{r}$ ou $r = \frac{e}{i}$, la résistance d'isolement devra donc être au minimum de $\frac{110}{0,000\,5} = 220\,000$ O.

Un défaut dans l'isolant d'un câble a pour effet de porter en ce point son conducteur à un potentiel d'autant plus voisin de celui de la terre, que le défaut est plus caractérisé. On a en conséquence l'habitude de désigner tout défaut d'isolement notable sous le nom de *terre*.

Indicateurs de terre. — Pour se rendre immédiatement compte de l'état général d'isolement du réseau, on emploie souvent à l'usine le dispositif suivant (fig. 186) : Deux lampes à incandescence, réglées chacune sur la tension de la distribution, sont montées en série entre les deux conducteurs principaux de celle-ci. Au point de jonction des deux lampes *a* et *b* vient se raccorder une sonnerie trembleuse mise d'autre part sur terre.

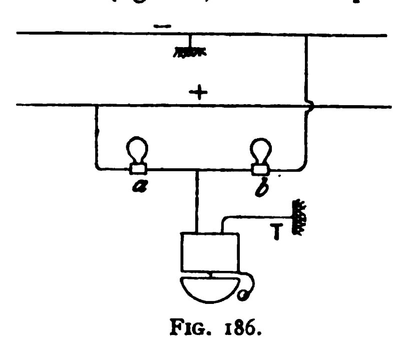


FIG. 186.

Quand l'isolement est satisfaisant, les deux lampes brûlent faiblement et la sonnerie reste muette. Dès qu'une terre se produit sur un des fils, le fil négatif, par exemple, ce conducteur prend le potentiel zéro, l'autre a par conséquent comme voltage celui de la distribution et la lampe *a* s'allume vivement, tandis que la sonnerie, entrant en fonctionnement, avertit le mécanicien que quelque chose d'anormal se passe. C'est donc la lampe en rapport avec le fil sain qui s'allume, l'autre s'éteignant.

M. Picou (*) a indiqué le moyen de transformer l'installation précédente, de manière à permettre l'évaluation de la résistance du défaut. A cette fin, la sonnerie est remplacée par un galvanoscope, et l'on intercale un rhéostat entre la terre T de celui-ci et le fil sain. On a dès lors constitué les éléments d'un pont de Wheastone. En manœuvrant le rhéostat de manière à annuler la déviation du galvanoscope, la résistance approximative du défaut est donnée par celle débouchée dans le rhéostat.

S'il s'agit d'une installation à courants alternatifs, les lampes seront remplacées par deux condensateurs simple-

(*) *Distribution de l'électricité : Installations isolées*, p. 104. Deuxième édition. Paris, Gauthier-Villars.

ment constitués de deux feuilles métalliques à larges surfaces très rapprochées et la sonnerie par un téléphone. A l'état normal, celui-ci restera silencieux ; il fera, au contraire, entendre un bourdonnement caractéristique dès qu'une terre se produit dans l'installation.

§ 3. — IMPÉDANCE DES CANALISATIONS. EFFET KELVIN. DÉTERMINATION DE LA SECTION.

Facteur d'impédance des lignes. — Nous avons vu que l'effet de la réactance d'un circuit parcouru par des courants variables est de produire une résistance apparente ou impédance plus élevée que la résistance mesurée au moyen des appareils habituels : ponts de Wheastone, etc. On appelle *facteur d'impédance* d'un conducteur parcouru par des courants alternatifs de fréquence déterminée, le coefficient par lequel il faut multiplier la résistance du conducteur pour obtenir son impédance. On le trouvera dans les formulaires.

La connaissance de ce coefficient est importante pour le calcul des lignes à courants alternatifs, afin de se rendre compte de la chute de tension, qui est plus élevée que lorsque la même ligne est parcourue par des courants continus de même intensité.

Dans les lignes aériennes, on n'a à se préoccuper que de la réactance $\omega\mathcal{L}$, la capacitance étant en général négligeable vis-à-vis d'elle. Le coefficient de selfinduction $\mathcal{L}$ est, par définition, le flux magnétique engendré dans un circuit par un courant égal à l'unité. Ce flux sera d'autant moins intense, c'est-à-dire que le coefficient $\mathcal{L}$ acquerra d'autant moins d'importance, que la réluctance sera plus grande. Il conviendra donc de diminuer la section offerte au flux, c'est-à-dire de rapprocher les conducteurs jusqu'à la limite compatible avec la sécurité.

Influence du diamètre et de la nature des fils : Effet Kelvin. — Lorsque le diamètre des fils et la fréquence

croissent, les ondes du courant tendent à se propager par les couches superficielles des conducteurs et leur résistance augmente. Le mécanisme de l'inégale répartition du courant dans la section peut s'expliquer comme suit :

Soit le circuit fermé AB (fig. 187) parcouru par un courant allant de A vers B derrière le plan de la feuille. Le passage du courant dans ce conducteur développe un champ magnétique dont les lignes de force entourent individuellement les deux brins et sont absorbées partiellement par eux. Le courant total peut être décomposé en filets parallèles à l'axe de chaque brin. Si nous considérons le filet central, nous voyons qu'il embrasse *tout* le flux développé. Son coefficient de selfinduction est donc maximum, ainsi que l'impédance qui diminue son intensité. Au contraire, au fur et à mesure qu'on s'écarte de l'axe, le flux embrassé diminue de toute la portion de ce flux existant à l'intérieur de la circonférence ayant le filet considéré pour rayon. Cette action est la plus marquée pour les filets de la périphérie qui n'embrassent, comme flux actif, que le flux total moins celui absorbé par le conducteur. Ce sont donc ces filets qui rencontrent le moins de résistance à la propagation des ondes électriques et, par suite, le courant se concentre dans l'épiderme du conducteur, effet d'autant plus marqué que le conducteur est plus gros, puisqu'il absorbe plus de flux ; que la pulsation de la force électromotrice est plus grande, puisqu'alors le facteur ω de la réactance $\omega\mathcal{L}$ devient plus consirable, et que le milieu dans lequel se propage le flux est plus perméable, puisqu'alors c'est le facteur $\mathcal{L}$ qui augmente.

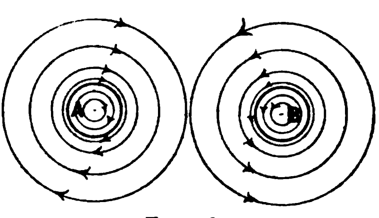


Fig. 187.

La variation de la résistance par suite de l'inégale répartition du courant est généralement peu élevée dans les lignes aériennes ordinaires en cuivre, aux fréquences employées dans la pratique. Ainsi, pour des conducteurs de 5 milli-

mètres de diamètre distants de 30 centimètres, l'augmentation de résistance n'est que de 6 °/₀ à la fréquence 50. Cependant quand les conducteurs arrivent à 10 millimètres de diamètre, le facteur d'impédance atteint déjà 1,63.

Pour le fer, les effets sont beaucoup plus marqués, grâce à sa grande perméabilité qui concentre le champ dans le conducteur et le renforce; aussi ce métal est-il impropre aux transmissions à variations rapides, par exemple aux transmissions téléphoniques.

Enfin, dans les circuits où les câbles dominent, la capacité l'emporte et le courant de capacité $\omega C e_{eff}'$ peut atteindre des valeurs notables. Il convient, dans ce cas, d'éviter les câbles concentriques et d'écarter le plus possible les câbles de polarités opposées.

Détermination de la section des conducteurs. — La section des conducteurs peut se déterminer soit d'après les conditions de sécurité (effet Joule), soit d'après la chute de tension que l'on admet ou qu'exigent les récepteurs, soit en se basant sur des considérations purement économiques.

1° **Effet Joule.** — La résistance d'une canalisation de longueur l est $r = \rho \frac{2l}{s}$, ρ étant la résistance spécifique du métal employé, $2l$ sa longueur effective (fil d'aller et fil de retour), s sa section. Si le conducteur est traversé par un courant i, la quantité de chaleur dégagée par seconde sera $ri^2 = \rho \frac{2l}{s} i^2$. Elle est inversement proportionnelle à la section. Quelles que soient les conditions spéciales auxquelles la canalisation doit satisfaire, il est essentiel que la section soit suffisante pour que l'échauffement ne compromette pas la résistance mécanique de la ligne, si celle-ci est aérienne, ou l'intégrité de son revêtement isolant, si elle est recouverte.

L'échauffement du conducteur dépend non seulement de l'effet Joule, mais aussi de la facilité avec laquelle il dégage son calorique soit par rayonnement, soit par conductibilité. Cette dissipation de la chaleur variera avec la nature de sa surface et du milieu dans lequel il se trouve.

LIGNES AÉRIENNES. — Les conducteurs nus se trouvent dans de bonnes conditions pour rayonner leur chaleur. Ils peuvent supporter sans inconvénient des densités de courant allant jusque 5 et 6 A par millimètre carré.

FILS SOUS MOULURES ET CABLES. — En supposant que le passage du courant puisse élever de 10° la température des conducteurs en cuivre d'une résistivité de 1,656 microhms à 0° C, l'intensité en ampères est liée à leur diamètre en millimètres par la formule

$$I = 4{,}375\, d^{\frac{3}{2}} \quad \text{ou} \quad d = 0{,}374\, I^{\frac{2}{3}}.$$

L'application de cette formule conduit à des densités de courant allant de 5 A par millimètre carré de section pour un diamètre de 1 millimètre, à 1 A pour un diamètre de 3 centimètres environ.

En pratique, on est limité par les prescriptions municipales. Par exemple, l'administration de l'usine d'électricité de la ville de Bruxelles n'admet pas plus de 2 A par millimètre carré pour les conducteurs transmettant moins de 50 A ; 1,5 A par millimètre carré de 50 à 200 A et 1 A par millimètre carré pour plus de 200 A.

2° **Chute de voltage.** — La chute de voltage dans une canalisation de résistance r, traversée par un courant i, est $ri = \frac{\rho 2li}{s}$. Si l'on s'impose une chute δV, on aura

$$\frac{\rho 2li}{s} = \delta V,$$

équation permettant de déterminer la seule inconnue s.

3° **Condition d'économie ; règle de lord Kelvin.** — Nous venons de voir que la quantité de chaleur dégagée par le conducteur d'une canalisation de l mètres est $\rho \frac{2li^2}{s}$ watts. Si la canalisation fonctionne t heures par an, la dissipation d'énergie qui en résulte est de $\rho \frac{2li^2}{s} t$ watts-heures.

Quant à son coût, il faut remarquer que la somme de frais de production de l'énergie électrique (comme de n'importe

quel produit en général) contient une quantité constante et une quantité proportionnelle à l'énergie développée. En effet, l'usine étant établie, son amortissement reste le même, que l'on marche plus ou moins. Les frais d'administration sont également indépendants de la production. Au contraire, les coûts du charbon, de l'huile, etc., sont proportionnels à l'énergie produite, et ce sont eux seulement qui doivent intervenir dans notre calcul, puisqu'il s'agit de watts supplémentaires produits. Appelons p le prix du watt supplémentaire. La dépense par effet Joule sera

$$\rho \frac{2l}{s} i^2 tp.$$

Cette dépense peut être réduite autant qu'on veut, en majorant la section. Mais alors, le coût des canalisations et, par suite, leur amortissement augmente. On conçoit qu'il existe une certaine section pour laquelle la somme des dépenses par effet Joule et d'intérêt et d'amortissement du capital soit minimum.

Le coût des canalisations comprend : d'une part, le prix du transport des matériaux, des tranchées, des remblais, etc., qui sont sensiblement indépendants de la section des conducteurs; d'autre part, le coût du ou des conducteurs et de leur isolant.

En appelant m le coût des tranchées ou supports par unité de longueur des conducteurs et n le prix de ceux-ci et de leur isolant par unité de volume, le coût de premier établissement ressortira, pour une canalisation bifilaire, à :

$$m2l + n2sl = 2(m + ns)l.$$

a représentant l'intérêt et l'amortissement du capital engagé, la dépense annuelle due aux canalisations seules sera $2(m + ns)la$, soit pour la dépense annuelle totale :

$$2 \frac{i^2 \rho l}{s} tp + 2(m + ns) la.$$

Elaguons la partie indépendante de la section $2mla$, il reste

$$\frac{2i^2\rho l}{s}tp + 2nsla.$$

Le produit de ces deux termes étant constant, leur somme est minimum quand ils sont égaux, ou, ce qui revient au même, quand leurs racines carrées sont égales, ce qui nous permet d'écrire directement :

$$i\sqrt{\rho tp} = s\sqrt{na} \quad \text{ou} \quad s = i\sqrt{\frac{\rho tp}{na}}.$$

La densité de courant la plus économique est donc

$$\frac{i}{s} = \sqrt{\frac{na}{\rho tp}}$$

et la chute de tension à laquelle on peut consentir ressort ainsi à :

$$\frac{i\rho 2l}{s} = 2l\sqrt{\frac{na\rho}{tp}}.$$

Nous avons supposé i constant. En pratique, le courant traversant les canalisations est presque toujours variable, mais ses variations ont généralement un caractère de périodicité permettant de déterminer les valeurs moyennes à introduire dans les formules. En appelant $i_1, i_2, i_3, \ldots$ les courants passant pendant les temps $t_1, t_2, t_3, \ldots$ heures; r la résistance de la ligne et t la durée totale d'utilisation des circuits, l'effet Joule moyen sera fourni par une intensité moyenne i_m, telle que $i_m^2 rt = i_1^2 rt_1 + i_2^2 rt_2 + \ldots.$

D'après des déterminations faites dans des distributions urbaines, $i_m = 2{,}34$ à $3{,}41$ fois le courant maximum.

Remarque. — La règle de lord Kelvin, établie sans tenir compte de la limitation pratique de la densité du courant, ni des exigences des récepteurs quant aux variations tolérables de voltage, peut conduire à des sections inadmissibles. On vérifiera donc, à ces deux points de vue, les résultats auxquels son application conduit.

§ 4. — APPAREILS ACCESSOIRES : COMMUTATEURS INTERRUPTEURS, FUSIBLES ET PARAFOUDRES.

Appareils accessoires. — Un certain nombre d'appareils accessoires, soit de manœuvre, soit de sécurité ou de protection, doivent se placer à l'origine des canalisations.

1° **Commutateurs et interrupteurs.** — Les *commutateurs* ont pour objet de permettre d'envoyer le courant soit en divers points d'un circuit, soit dans un ou plusieurs autres circuits. Nous en avons rencontré plusieurs exemples. Le collecteur des dynamos n'est rien autre qu'un commutateur tournant ; les adjoncteurs de charge et de décharge des accumulateurs, les lames glissantes des rhéostats de champ sont des commutateurs. Les *interrupteurs* établissent ou suppriment simplement l'admission du courant dans une ou plusieurs canalisations, toujours les mêmes. Ils constituent donc un cas particulier des commutateurs. Mais, comme la constitution de leurs organes essentiels n'est pas sensiblement différente et qu'ils sont plus répandus dans les installations industrielles, c'est sur eux que portera plus particulièrement notre examen. Ils se divisent en deux grandes classes : les interrupteurs à main et les interrupteurs automatiques.

INTERRUPTEURS A MAIN. — *a*) RUPTURE LENTE. — Si la canalisation est à bas potentiel et ne véhicule que des courants peu intenses (moins d'un demi-ampère), l'interrupteur peut consister en une simple lame pivotante, que l'on amène, à la main, sur un plot. La lame et le plot sont raccordés aux points à réunir.

b) RUPTURE BRUSQUE. — Dès que le potentiel ou l'intensité s'élève, il devient nécessaire de prévoir un dispositif rompant brusquement le circuit, de manière à réduire à un minimum le temps pendant lequel persiste l'arc consécutif à la rupture. L'appareil comporte un (interrupteur unipolaire) ou plusieurs (interrupteur multipolaire) couteaux en cuivre C (fig. 188) pivotant autour d'un axe et sollicités par un ressort R.

Le couteau peut être amené dans les deux mâchoires métalliques MM, réunies à des douilles SS d'attache des conducteurs au moyen d'un levier pourvu d'une poignée isolante P. Pour rompre le circuit, on soulève le levier P dont un ergot vient faire basculer le couteau C. Sous la traction de R, celui-ci se sépare alors brusquement des mâchoires, coupant brusquement le courant.



Fig. 188.

On prévient un échauffement dangereux des couteaux et des mâchoires, en leur donnant une surface de contact d'au moins 3 millimètres carrés par ampère. La longueur de la rupture produite doit être au minimum de 1 centimètre par 100 volts dans l'air, et par 500 volts dans l'huile.

Interrupteurs automatiques. — Il peut être nécessaire de couper un circuit dès que le courant tombe (charge des accumulateurs) ou s'élève (question de sécurité pour l'effet Joule) à une valeur donnée. De là les interrupteurs à minima et à maxima. Ces appareils comportent tous l'emploi d'un électro-aimant enclenchant un ou des couteaux continuellement sollicités à rompre un ou des circuits sous l'action de contre-poids ou de ressorts. Dès que le courant dépasse les limites fixées, le déclenchement se produit.

A titre d'exemple, décrivons un interrupteur à minima fréquemment employé dans les installations à accumulateurs. Deux godets G_1, G_2 (fig. 189) remplis de mercure se rattachent à des bornes de connexion B_1, B_2, le premier directement, le second par l'intermédiaire de l'électro E dont l'armature A, pivotant autour de l'axe O, est sollicitée vers le haut par le contre-poids C. En abaissant l'armature A à la main, des plongeurs P viennent baigner dans le mercure, le courant

peut passer, retenant dès lors l'armature abaissée, si son intensité est suffisante. Quand celle-ci tombe à une valeur

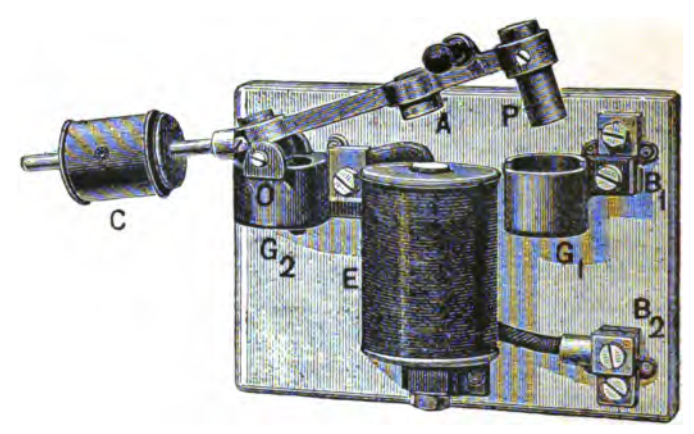


FIG. 189.

déterminee, l'action du contrepoids prédomine et le circuit est automatiquement rompu.

Fusibles, coupe-circuits ou sûretés. — Les interrupteurs à maxima sont excellents, mais coûteux. En pratique, par raison d'économie, on évite les dangers d'échauffement exagéré principalement dus à des courts-circuits, en insérant à l'origine des conducteurs, des fils ou lames en métal fusible, qui fondent dès que l'intensité dépasse le double ou le triple de l'intensité normale.

Les métaux les plus employés dans ce but sont l'étain, divers alliages de plomb, bismuth, étain, zinc, enfin le platine. Ce dernier métal est réservé pour les très faibles intensités, en raison de son prix élevé.

La longueur du fusible ne doit jamais descendre au-dessous de 2 centimètres, pour éviter l'influence refroidissante des attaches.

On doit le protéger mécaniquement en le plaçant sous un couvercle isolant ou dans des boîtes vitrées à parois suffisamment écartées pour ne pas craindre les dangers d'incendie.

Lames. — Les lames fusibles (fig. 190) se terminent souvent par des pattes renforcées permettant de les serrer dans les bornes. Elles présentent fréquemment en leur milieu un

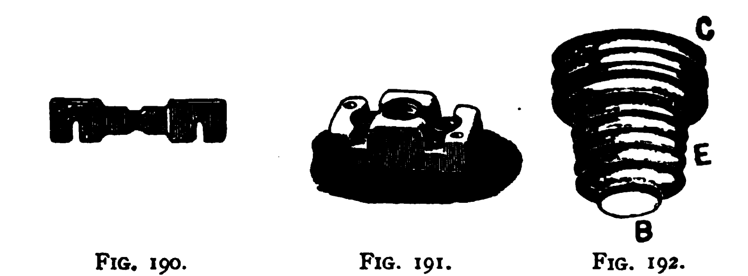


Fig. 190. Fig. 191. Fig. 192.

étranglement qui favorise un sectionnement net. Quand les courants sont intenses, il est préférable de remplacer la lame qui donne lieu à des projections de métal fondu, par des fils disposés en dérivation.

Fusibles Edison. — Le dispositif Edison est très répandu. Il comporte un bouchon creux en porcelaine (fig. 192), portant à sa partie inférieure un piton B et extérieurement un pas de vis en métal embouti E. Ces deux pièces sont réunies par un fil fusible ; le reste de la cavité centrale est obturé par de l'asbeste retenu par un couvercle vissé C. Le socle (fig. 191) présente un filet de vis embouti, raccordé à une borne, tandis que le fond métallique qui en est isolé se raccorde à l'autre borne.

En vissant à refus le bouchon dans le socle, le piton B vient prendre contact avec le fond, tandis que la vis E s'applique sur la douille en rapport avec l'autre borne. Le fusible se trouve ainsi inséré dans la canalisation.

Les bouchons et les douilles des diverses intensités courantes sont de dimensions différentes, ce qui empêche qu'on puisse les remplacer par des appareils de plus fort calibre.

Quand il s'agit de hautes tensions, il convient d'adopter de longs fusibles, pour éviter la production d'un arc permanent. Le fil est en outre entouré d'une masse convenablement divisée, ayant pour objet de condenser la vapeur métallique

et ainsi étouffer l'arc dès sa formation. Souvent les fusibles servent alors d'interrupteurs (fig. 193). Enfermés dans un tube isolant T, ils se raccordent par leurs extrémités à un collier C portant un ergot qui peut s'introduire dans les mâchoires M.

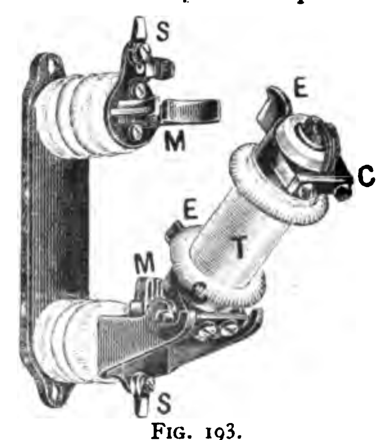


FIG. 193.

Position des fusibles. — Le fusible se pose à l'origine de tout changement de section dans les canalisations. De cette manière, la rupture de courant causée par son fonctionnement, n'affecte que le branchement dans lequel le court-circuit s'est produit. On les groupe avec avantage sur des tableaux, de manière à faciliter leur remplacement.

Degré de sécurité obtenu. — Le fonctionnement du fusible est précaire, et cela se conçoit aisément. Soit C la quantité de chaleur nécessaire pour amener sa fusion. Le calorique emmagasiné par seconde est égal à celui reçu

$$i^2 r = \frac{i^2 \rho l}{s} = \frac{kli^2}{d^2}$$

diminué de celui dégagé par rayonnement, lequel est proportionnel à sa surface $k'd$. Nous négligeons l'effet de convection par les attaches et supposons constants aux diverses températures, les coefficients entrant dans les formules. Pour amener la fusion, il faudra que

$$\left(\frac{kli^2}{d^2} - k'd\right) t = C.$$

Cette équation est une fonction très complexe de i, l, d et t, à laquelle on pourra satisfaire d'une infinité de manières.

Plus i est faible, plus t devra être considérable pour amener la fusion, et l'intensité limite dépendra essentiellement, pour un fusible donné, de la rapidité avec laquelle l'augmentation de l'intensité se produit.

En raison de ce caractère d'incertitude, il conviendra d'accorder la préférence, autant que possible, aux appareils automatiques dont le fonctionnement peut être assuré à 5 °/₀ près de l'intensité maximum.

Protection contre la foudre. — Lorsqu'une partie quelconque d'une installation est aérienne, il y a lieu de la protéger, ainsi que les canalisations en fil recouvert qui s'y raccordent, par des parafoudres.

Lignes aériennes. — PARAFOUDRES DES SUPPORTS. — Il est utile de protéger les supports placés sur des éminences. Un dispositif simple pourra être constitué de deux fils de fer galvanisés de 3 à 4 millimètres de diamètre, fixés sur deux faces opposées, venant se terminer en pointes aériennes à la tête du support, et se raccordant au pied de celui-ci, à une plaque en zinc, en cuivre ou en fonte, d'environ 50 centimètres de côté, enfouie dans le sol perpétuellement *humide*, autant que possible.

Le rôle d'un tel parafoudre est double : il offre une voie aisée à la décharge et, si l'élévation de potentiel n'est pas trop brusque, il atténue cette dernière s'il ne la supprime, en permettant à l'électricité induite dans le sol de fuser par ses pointes en tendant ainsi à rétablir l'équilibre des potentiels.

PARAFOUDRES DES CONDUCTEURS. PARAFOUDRES A CORNES. — Si la décharge atmosphérique emprunte des conducteurs, il est désirable de l'en faire sortir pour éviter qu'elle n'atteigne les appareils. Or, comme elle affecte souvent la forme d'une décharge oscillante, l'impédance des circuits lui oppose une telle obstruction qu'elle a une grande tendance à provoquer des décharges latérales, d'ailleurs très destructives pour les constituants de la ligne. Il est donc utile de munir les conducteurs industriels aériens de parafoudres à cornes constitués par une ou plusieurs paires d'arcs métalliques diver-

gents CC_1 (fig. 194), séparés à la base par un intervalle d'air I et raccordés les uns C au fil à protéger, les autres C_1 à la terre.

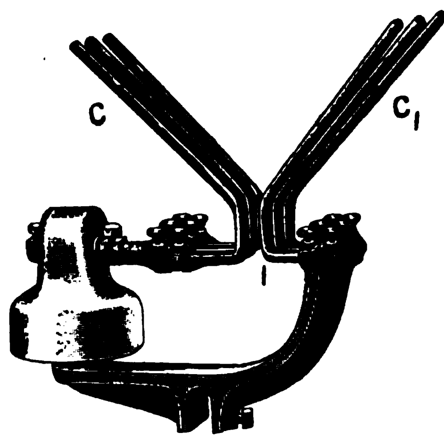


Fig. 194.

Une décharge atmosphérique à haute tension franchit aisément l'espace d'air I, puis, si le voltage de la ligne est suffisant pour alimenter l'arc momentané développé, celui-ci, poussé vers le haut par le courant d'air chaud qui se développe, se propage le long des cornes et s'allonge jusqu'à rupture.

Le nombre des cornes à admettre dépend de la tension de l'installation. Leur distance à la base en est fonction aussi; elle ne doit pas être inférieure à 8 millimètres dans les endroits découverts. S'il s'agit de locaux couverts, il faut réserver au moins 1m50 entre les pointes supérieures des cornes et le plafond, pour éviter tout danger d'incendie.

Parafoudres a disques. — Lorsque la tension des canalisations ne s'élève pas au delà de 800 volts, on peut employer des parafoudres constitués par des disques en laiton ou en zinc superposés et séparés par des disques isolants. Les disques métalliques extrêmes sont reliés au fil à protéger et à la terre. La décharge atmosphérique jaillit entre les disques, et l'arc ne peut se maintenir par suite de sa subdivision et de l'inaptitude des vapeurs de zinc à l'entretenir.

Parafoudres a cylindres. — Les disques sont parfois remplacés par des cylindres en alliages métalliques contenant du zinc, placés parallèlement, à très faible distance l'un de l'autre et en nombre variable avec la tension des courants utilisés.

Parafoudres des appareils : Parafoudres a pointes. — Les machines ou appareils sont généralement protégés par des peignes métalliques à dents aiguës L_1L_2 (fig. 195), raccordés aux fils de ligne. Les peignes sont placés vis-à-vis et à faible distance d'autres peignes reliés à la terre. Pour éviter qu'après un coup de foudre un arc permanent ne les détruise, un fusible est interposé dans le fil qui les raccorde aux lignes.

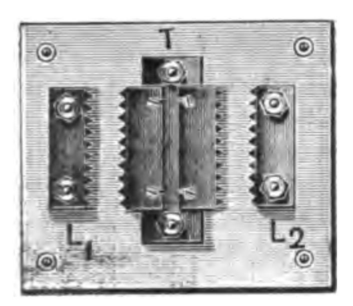


Fig. 195.

On facilite la décharge disruptive entre les peignes en insérant immédiatement avant les machines quelques spires de fil dont la faible inductance est néanmoins suffisante pour présenter une obstruction insurmontable aux manifestations orageuses de très haute fréquence.

Dans les installations à bas potentiel (télégraphiques et téléphoniques), on combine souvent les paratonnerres précédents en assurant un écartement très faible des surfaces métalliques en présence, par l'interposition d'une feuille de papier. L_1 et L_2 (fig. 196) sont des plaques raccordées aux fils de ligne au moyen des bornes L_1 et L_2. Elles se terminent en peigne vis-à-vis de la plaque de terre T. En outre, une plaque prenant directement appui sur cette dernière, repose sur les deux autres par l'intermédiaire d'une mince feuille de papier.

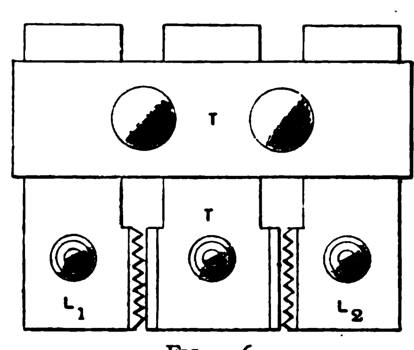


Fig. 196.

On remplace souvent les plaques métalliques par des prismes de charbon dur séparés par une feuille de mica, pour empêcher que le fonctionnement du parafoudre ne provoque le soudage des plaques et une mise sur terre permanente.

CHAPITRE XV

TRANSPORT DE L'ÉNERGIE

§ 1. — CHOIX DU COURANT.

Nous allons chercher *le poids du cuivre exigé dans les canalisations par les diverses espèces de courant, pour transmettre à la même distance* l *et avec la même perte par effet Joule, une puissance déterminée* W *sous un voltage donné.*

La résistance d'un conducteur de longueur l, de résistivité ρ et de section s est, comme nous le savons, donnée par l'équation $R = \rho \frac{l}{s}$. Puisque son poids $p = sl\delta$, δ étant le poids spécifique, la résistance

$$R = \frac{\rho l^2 \delta}{p} = \frac{K}{p}.$$

Elle est inversement proportionnelle au poids du conducteur.

Pour simplifier, nous supposerons les courants alternatifs en concordance de phase, c'est-à-dire $\cos\varphi = 1$. C'est une hypothèse qui leur est favorable relativement au courant continu puisque, à force électromotrice maximum donnée, pour transmettre une puissance déterminée, le courant alternatif décalé de φ devra être majoré dans le rapport $\frac{1}{\cos\varphi}$, et l'effet Joule augmentera dans le rapport $\frac{1}{\cos^2\varphi}$. Toutefois, nos conclusions n'en seront pas altérées, le problème étant, pour le courant continu, limité par d'autres facteurs que l'effet Joule. D'ailleurs, au point de vue des diverses espèces de courants alternatifs, la comparaison restera exacte.

Courant alternatif. — $W = e_{eff} i_{eff}$. Le courant alternatif exige deux fils de ligne que l'on choisit de sections égales. Le poids d'un fil est

$$p = \frac{P}{2} = \frac{K}{R}, \quad \text{d'où pour sa résistance} \quad R = \frac{2K}{P},$$

P représentant le poids total.

L'effet Joule développé dans le circuit (2 fils de résistance R) sera

$$2 \cdot \frac{2K}{P} \cdot i_{eff}^2 = \frac{4KW^2}{Pe_{eff}^2}.$$

Courant continu. — $W = e_{eff} i_{eff} = EI$. Si nous opérons la transmission au moyen de courant continu, la tension de celui-ci pourra naturellement être celle maximum qu'acquiert le courant alternatif comparé. Or $e_{eff} = \frac{E}{\sqrt{2}}$. Donc le courant continu utilisé aura une tension $E = e_{eff}\sqrt{2}$. Remplaçons dans la valeur de W :

$$W = \frac{E}{\sqrt{2}} i_{eff} = EI,$$

d'où, pour l'intensité du courant continu,

$$I = \frac{i_{eff}}{\sqrt{2}}.$$

En appelant R_1 la résistance d'un des fils du circuit dans lequel se propage le courant continu, l'effet Joule y sera $R_1 \frac{i_{eff}^2}{2}$. Égalons-le à l'effet Joule Ri_{eff}^2 obtenu avec le courant alternatif, nous trouvons $R_1 = 2R$. La résistance du circuit pourra être double, c'est-à-dire qu'à longueur égale, sa section sera la moitié et le poids de cuivre la moitié de celui qu'exige le courant alternatif.

Le poids total de cuivre exigé par le courant continu, n'est que la moitié de celui requis par le courant alternatif.

Polyphasé en étoile. — Envisageons maintenant le cas d'un générateur à *n* circuits montés en étoile. Chaque branche

de l'étoile étant le siège d'une force électromotrice efficace e'_{eff} et d'un courant i'_{eff}, la puissance développée sera

$$n e'_{\text{eff}} i'_{\text{eff}} = \text{W}, \quad \text{d'où} \quad i'_{\text{eff}} = \frac{\text{W}}{n e'_{\text{eff}}}.$$

Puisque c'est la tension régnant entre deux fils consécutifs de ligne qui gouverne le problème, nous allons chercher la relation qui la relie à la force électromotrice des branches de l'étoile.

Soient v (fig. 197) le potentiel ou centre de l'étoile et u la force électromotrice maximum qui se développe dans chaque bobine. La force électromotrice au point 1 de connexion du premier fil de ligne sera au moment t : $v + u \sin \omega t$; au même moment, celle au point 2 sera : $v + u \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{n}\right)$. On aura pour la différence de potentiel entre 1 et 2 :

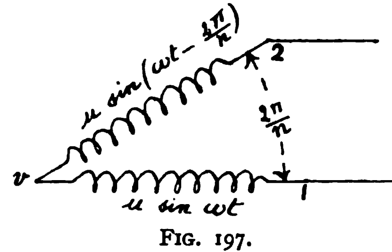


FIG. 197.

$$v + u \sin \omega t - v - u \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{n}\right) = 2u \sin\frac{\pi}{n} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{n}\right).$$

Nous voyons donc qu'ayant une force électromotrice maximum u dans chacune des branches de l'étoile, la différence de potentiel entre deux fils consécutifs de ligne est égale à $u \cdot 2 \sin\frac{\pi}{n}$, le cosinus marquant simplement le caractère périodique du phénomène (*).

Si la force électromotrice efficace dans une branche est e'_{eff}, la force électromotrice efficace entre deux fils de ligne sera

---

(*) Faisons remarquer, en passant, que cette démonstration est la justification algébrique du procédé géométrique suivi jusqu'ici pour trouver la différence de potentiel entre deux sommets consécutifs d'un système polyphasé.

$2 \sin \frac{\pi}{n} e'_{eff}$. Posons-la égale à e_{eff}, comme dans le premier cas,

$$2 \sin \frac{\pi}{n} e'_{eff} = e_{eff} \quad \text{ou} \quad e'_{eff} = \frac{e_{eff}}{2 \sin \frac{\pi}{n}}.$$

Remplaçons dans la valeur de i'_{eff}

$$i'_{eff} = \frac{2 \sin \frac{\pi}{n} W}{n e_{eff}}.$$

p' représentant le poids d'un fil de ligne, on aura pour la perte par effet Joule

$$n \cdot \frac{K}{p'} \cdot \frac{4 \sin^2 \frac{\pi}{n} W^2}{n^2 e^2_{eff}}.$$

Égalons à la perte obtenue dans le cas du courant alternatif

$$\frac{K 4 \sin^2 \frac{\pi}{n} W^2}{p' n e^2_{eff}} = \frac{4 K W^2}{P e^2_{eff}}, \quad \text{d'où} \quad np' = P' = P \sin^2 \frac{\pi}{n}.$$

Triphasé. — Si le système est triphasé,

$$n = 3, \quad \sin \frac{\pi}{3} = \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} \quad \text{et} \quad P' = 0{,}75\ P.$$

Le poids de cuivre exigé par le courant triphasé en étoile est égal aux trois quarts de celui nécessaire au courant alternatif.

Remarque. — Lorsque l'intensité du courant n'est pas exactement égale dans les divers fils de ligne, par suite de dissymétrie entre les circuits récepteurs, le système n'est plus exactement polyphasé, et il y a utilité de réunir les centres de l'étoile par un quatrième fil de ligne. On économise en général ce dernier, en raccordant les centres à la terre.

Polyphasé en polygone. — Si le dispositif est en polygone, la force électromotrice existant entre deux sommets consécutifs sera celle e_{eff} admise pour la transmission. En

appelant i''_{eff} l'intensité efficace des courants circulant dans chacun des côtés du polygone

$$n e_{\text{eff}} i''_{\text{eff}} = W, \quad \text{d'où} \quad i''_{\text{eff}} = \frac{W}{n e_{\text{eff}}}.$$

Pour déterminer l'effet Joule produit dans la ligne, cherchons l'intensité des courants traversant ses conducteurs. Or, le courant dans chacun de ceux-ci est évidemment égal à tout instant (première loi de Kirchhoff) à la différence entre les courants dans les deux branches adjacentes du polygone (fig. 198). Son intensité est par conséquent proportionnelle à

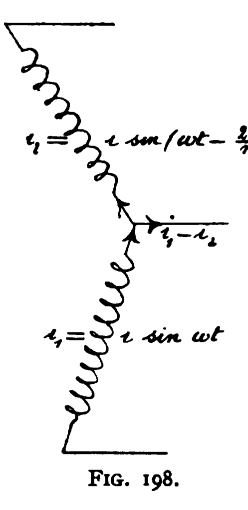


Fig. 198.

$$\sin \omega t - \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{n}\right)$$
$$= 2 \sin\frac{\pi}{n} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{n}\right)$$

et son intensité efficace

$$i''_{1\text{eff}} = 2 \sin\frac{\pi}{n}\, i''_{\text{eff}}.$$

L'effet Joule a pour valeur

$$n \frac{K}{p''} i''^{2}_{1\text{eff}} = \frac{nK}{p''} \cdot 4 \sin^2\frac{\pi}{n}\, i''^{2}_{\text{eff}} = \frac{nK 4 \sin^2\frac{\pi}{n} W^2}{p'' n^2 e^2_{\text{eff}}}.$$

Triphasé. — C'est précisément la même valeur que dans le montage en étoile, de sorte que le poids de cuivre nécessaire avec le polygone est le même : $P'' = 0{,}75\ P$.

Biphasé avec quatre fils de ligne. — Si nous avons deux circuits séparés pour le biphasé, leur tension sera e_{eff}. L'intensité efficace i'''_{eff} devra satisfaire à la condition

$$2 e_{\text{eff}} i'''_{\text{eff}} = W \quad \text{ou} \quad i'''_{\text{eff}} = \frac{W}{2 e_{\text{eff}}}.$$

p''' étant le poids de chacun des fils de ligne de résistance

$$r''' = \frac{K}{p'''} = \frac{4K}{P'''},$$

l'effet Joule ressortira à

$$4 \cdot \frac{4K}{P'''} \cdot \frac{W^2}{4e_{eff}^2} = \frac{4KW^2}{P'''e_{eff}^2}.$$

En imposant la même perte qu'avec l'alternatif,

$$\frac{4KW^2}{P'''e_{eff}^2} = \frac{4KW^2}{Pe_{eff}^2}$$

et le poids de cuivre total nécessaire $P''' = P$, c'est-à-dire *est le même que pour l'alternatif.*

Biphasé avec trois fils de ligne. — Un des conducteurs sert de retour au courant des deux autres. Voyons quelle différence de potentiel va régner entre les deux fils de ligne, en fonction de celle e_{eff}^{IV} existant dans chaque circuit.

Les forces électromotrices dans ceux-ci sont à l'instant t :

$$e_1 = E^{IV} \sin \omega t, \quad e_2 = E^{IV} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Leur différence

$$e_1 - e_2 = 2E^{IV} \sin \frac{\pi}{4} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right) = \sqrt{2}\, E^{IV} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right),$$

c'est-à-dire que le voltage entre les deux fils de ligne est $\sqrt{2}$ fois celui existant entre chaque fil de ligne et le retour commun. Comme le voltage le plus élevé est égal à e_{eff} par hypothèse, nous aurons :

$$e_{eff}^{IV} \sqrt{2} = e_{eff}, \quad \text{d'où} \quad e_{eff}^{IV} = \frac{e_{eff}}{\sqrt{2}}.$$

Appelons i_{eff}^{IV} le courant circulant dans chacun des circuits. Nous aurons :

$$2 \frac{e_{eff}}{\sqrt{2}} i_{eff}^{IV} = W, \quad \text{d'où} \quad i_{eff}^{IV} = \frac{W}{\sqrt{2}\, e_{eff}} = \frac{i_{eff}}{\sqrt{2}}.$$

Cherchons quelle section nous devrons donner au fil de retour. Le courant qui le parcourt à chaque instant est

$$\frac{I^{IV}}{\sqrt{2}} \sin \omega t + \frac{I^{IV}}{\sqrt{2}} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{2I^{IV}}{\sqrt{2}} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right) \cos\frac{\pi}{4}$$

$$= I^{IV} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right).$$

Donc le rapport de l'intensité du courant dans le retour à celle dans un des fils de ligne est $= \sqrt{2}$ et le poids du retour doit être $\sqrt{2}$ fois plus grand que celui d'un fil de ligne, pour y maintenir la même densité de courant. p^{IV} étant le poids de chacun des fils de ligne, celui du fil de retour sera $p^{IV}\sqrt{2}$.

La perte en ligne sera alors

$$2\frac{K}{p^{IV}}\frac{W^2}{2e^2_{eff}} + \frac{K}{p^{IV}\sqrt{2}} \cdot \frac{W^2}{e^2_{eff}} = \frac{KW^2}{p^{IV}e^2_{eff}}\left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}}\right).$$

Égalons-la, comme dans les cas précédents, à la perte consentie pour l'alternatif

$$\frac{KW^2}{p^{IV}e^2_{eff}} \frac{\sqrt{2}+1}{\sqrt{2}} = \frac{4KW^2}{Pe^2_{eff}}, \quad \text{d'où l'on tire} \quad p^{IV} = \frac{\sqrt{2}+1}{4\sqrt{2}} P.$$

Le poids total est

$$\frac{\sqrt{2}+1}{2\sqrt{2}} P + \frac{\sqrt{2}+1}{4} P = 1{,}456\, P.$$

En résumé, le transport à la même distance sous un potentiel donné entre deux fils de ligne, d'une puissance déterminée, avec la même perte en ligne, exige les poids de cuivre :

Alternatif	100
Continu	50
Triphasé (étoile ou polygone)	75
Biphasé 4 fils	100
Id. 3 fils	145,6.

Le coût de la ligne représentant une fraction d'autant plus notable du coût total qu'elle est plus développée, on s'explique qu'il ne reste en présence, pour le transport de l'énergie à grande distance, que les courants continus et triphasés.

§ 2. — COURANTS CONTINUS.

Supposons qu'il s'agisse de machines à excitation indépendante ou en série. Appelons e la force électromotrice aux bornes de la génératrice, P la puissance mécanique qu'elle absorbe, e' la force électromotrice aux bornes de la réceptrice, p la puissance mécanique qu'elle restitue, I l'intensité du courant traversant le circuit et R la résistance de la ligne réunissant les deux machines.

Nous savons que les rendements industriels de la génératrice et du moteur ont respectivement pour expression

$$\eta_g = \frac{eI}{P}, \quad (1) \qquad \eta_m = \frac{p}{e'I}, \quad (2)$$

d'où, en multipliant membre à membre,

$$\frac{p}{P} = \eta = \eta_g \eta_m \frac{e'}{e}. \quad (3)$$

Le rendement de la transmission est donc égal au produit des rendements industriels des deux machines, par le rapport $\frac{e'}{e}$, qu'il sera conséquemment avantageux de rendre le plus élevé possible.

Or la loi d'Ohm, appliquée à la ligne seule, nous donne

$$I = \frac{e - e'}{R}.$$

En remplaçant I par sa valeur tirée de (1)

$$\frac{\eta_g P}{e} = \frac{e - e'}{R}, \quad \text{d'où} \quad \frac{e'}{e} = 1 - \frac{\eta_g PR}{e^2},$$

et l'on voit que pour augmenter le rapport $\frac{e'}{e}$, il convient (η_g et P étant déterminés par les conditions du problème et

dès lors invariables) de diminuer la résistance R de la ligne et majorer le voltage de départ *e* le plus possible.

La valeur $R = \frac{\rho L}{s}$, ρ étant la résistance spécifique du métal employé, L la distance sur laquelle se fait le transport et *s* la section du conducteur. On réduira la résistance de la ligne en employant un métal très conducteur (ρ très faible) et augmentant sa section. On est toutefois limité dans cette dernière voie par le coût du métal qui est proportionnel à sa section.

Pour ce qui concerne *e*, on n'a guère dépassé jusqu'ici la tension de 14 à 15 000 volts. Ces hautes tensions sont obtenues en montant en série un certain nombre de génératrices dont la tension individuelle n'excède pas 2 000 volts, à cause des gerbes d'étincelles se produisant alors au collecteur.

En résumé, les deux points dont il y a spécialement lieu de se préoccuper dans un transport d'énergie sont : *diminuer la résistance de la ligne et augmenter le voltage utilisé autant que possible.*

Systèmes utilisés. Généralités. — Au point de vue du mode d'enroulement de l'induit, on emploiera de préférence l'anneau avec un grand nombre de touches au collecteur, afin de réduire la différence de potentiel existant entre les organes voisins.

Quant aux inducteurs, l'enroulement en dérivation présente l'inconvénient de conduire à des machines coûteuses, par suite de la nécessité de les constituer en fil très fin. En outre, la grande selfinductance qui en résulte, rend dangereuses les variations brusques du régime.

Lorsqu'une haute tension est requise, on adoptera donc de préférence *l'anneau Gramme excité d'une manière indépendante ou en série.* Des précautions minutieuses devront être prises pour assurer l'isolation des machines et appareils : les enroulements inducteurs et induits seront spécialement isolés de leurs bâti et arbre ; les machines elles-mêmes se fixeront au socle par l'intermédiaire de mastics isolants, tels qu'un mélange de soufre et verre pilé ; enfin, pour augmenter

la sécurité, tous les appareils siége de la haute tension seront entourés d'un plancher maintenu sec.

Excitation indépendante. — Ce mode d'excitation adopté au début du transport de l'énergie électrique présente l'avantage de restreindre les parties sous haute tension à l'induit des machines et à la ligne. En outre, une plus grande sécurité est obtenue par l'alimentation des inducteurs à bas potentiel. Mais une difficulté naît lors du démarrage à la station réceptrice, attendu que le récepteur entraînant l'excitatrice, à l'état de repos ses inducteurs ne sont pas aimantés et son couple moteur est nul.

EMPLOI D'UNE BATTERIE D'ACCUMULATEURS. — On tourne cette difficulté en munissant la station réceptrice d'une batterie d'accumulateurs dont on envoie le courant dans l'excitatrice, à la mise en marche. Celle-ci fonctionnant comme moteur entraîne la réceptrice non chargée. Dès qu'une vitesse suffisante est atteinte, les connexions normales sont rétablies et la charge est admise.

SYSTÈME MARCEL DEPREZ. — M. Marcel Deprez envoie, au début, le courant dans les inducteurs et l'induit de la réceptrice entraînant simplement son excitatrice. La vitesse obtenue est suffisante pour permettre l'amorcement de l'excitatrice sur une résistance artificielle. Dès que l'excitatrice est amorcée, on rétablit les connexions normales, et la charge est admise progressivement.

Machines série. — L'emploi des machines série est plus simple. Aucune précaution spéciale n'est à prendre au démarrage; en outre, la vitesse du moteur peut se régler automatiquement sur celle de la génératrice.

Remarquons d'abord que l'on peut tracer, pour les moteurs, des courbes caractéristiques entièrement semblables à celles que l'on relève sur les génératrices. La caractéristique totale, notamment, se dressera en portant suivant l'axe de X les courants, et sur les ordonnées correspondantes, une longueur proportionnelle à la force électromotrice à appli-

quer pour obtenir la vitesse invariable choisie sous diverses charges.

Considérons maintenant (fig. 199) les caractéristiques extérieures e d'une génératrice et totale E_1 d'un moteur.

A la distance OA de l'origine, menons une parallèle à l'axe des E. Elle coupera les deux courbes suivant les ordonnées AC et AB qui représentent : la première, la force électromotrice aux bornes de la génératrice, lorsque, tournant à la vitesse N, elle débite le courant OA ; la seconde, la force électromotrice que la réceptrice exige à ses bornes, lorsque, traversée par le courant OA, elle tourne à la vitesse N. La différence BC représente par conséquent la chute de potentiel dans le circuit reliant les deux machines. Portons-la suivant AD.

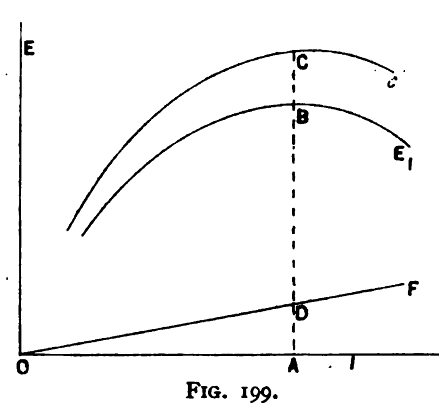


Fig. 199.

Procédons de même pour un certain nombre d'autres valeurs de l'intensité du courant. Nous déterminons ainsi les points d'une courbe qui, en général, s'approche beaucoup d'une droite. Si donc deux dynamos sont construites de manière que leurs caractéristiques restent proportionnelles, il suffira de choisir la résistance r de la ligne de manière que la chute de tension rI soit, pour tous les régimes, égale à la différence des deux caractéristiques. Dans ces conditions, tant que la vitesse de la génératrice reste invariable, celle de la réceptrice se maintient sensiblement constante.

Éléments d'un transport à distance. — Le problème à résoudre dans une transmission électrique est généralement le suivant : *Transporter à une distance* L *kilomètres avec un rendement* η *une puissance* P *watts disponible à la station de départ; déterminer les machines à employer et la section du conducteur.*

La puissance disponible à l'arrivée $p = \eta P$. Les puissances des machines étant connues, ainsi que leurs rendements industriels que l'on impose, le seul facteur arbitraire sera la tension e aux bornes de la génératrice. On la prendra aussi grande que possible. De l'équation (1), précédemment écrite, on pourra dès lors tirer la valeur de l'intensité I du courant

$$I = \frac{\eta_g P}{e}. \qquad (1)$$

En appelant R la résistance de la ligne, la perte par effet Joule sera :

$$RI^2 = \frac{R\eta_g^2 P^2}{e^2}.$$

Cette perte est évidemment égale à la différence des puissances disponibles aux bornes des deux machines, soit

$$\eta_g P - \frac{p}{\eta_m} = \eta_g P - \frac{\eta P}{\eta_m} = \frac{P(\eta_g \eta_m - \eta)}{\eta_m}.$$

On a donc

$$\frac{R\eta_g^2 P^2}{e^2} = \frac{P(\eta_g \eta_m - \eta)}{\eta_m}, \quad \text{d'où} \quad R = \frac{(\eta_g \eta_m - \eta)e^2}{\eta_m \eta_g^2 P}. \qquad (4)$$

En remplaçant R par sa valeur en fonction de la section, on déterminera aisément celle-ci.

Application. — *Supposons que l'on veuille transporter à 20 kilomètres une puissance de 150 chevaux sous 4 000 volts aux bornes des génératrices, avec un rendement total de 0,75.*

Imposons aux machines des rendements de 0,9. De l'équation (1), nous tirons la valeur du courant traversant le circuit :

$$I = \frac{P\eta_g}{e} = \frac{150 \cdot 736 \cdot 0{,}9}{4\,000} = 24{,}8 \text{ A.}$$

(4) donne pour résistance de la ligne

$$R = \frac{(0{,}81 - 0{,}75)\, 16\,000\,000}{0{,}9 \cdot 0{,}81 \cdot 150 \cdot 736} = 11{,}9\ \text{O}.$$

La section s se déduira de l'équation

$$11{,}9 = \frac{\rho \cdot 2 \cdot 2\,000\,000}{s}.$$

Si l'on utilise du bronze d'une résistivité $\rho = 2 \cdot 10^{-6}$, on obtient $s = 0{,}67$ centimètre carré.

§ 3. — COURANTS TRIPHASÉS.

Généralités. — La faculté que présentent les moteurs asynchrones de démarrer sous charge les fera préférer. Ici, on sera moins limité qu'en courant continu, au point de vue de l'élévation de la tension. On passera aisément aux très hautes tensions au moyen de transformateurs statiques, appareils robustes, sans organes mobiles, dont on pourra rendre l'accès impossible, pour éviter les accidents. A la station réceptrice, on repassera au moyen d'appareils semblables de la haute à la basse tension. Les pressions dangereuses resteront ainsi confinées dans des organes fixes inaccessibles et dans la ligne.

Les tensions admissibles ne peuvent guère dépasser 50 000 volts, du moins avec des conducteurs aériens. Vers cette limite, les fils deviennent lumineux dans l'obscurité, et une importante déperdition de l'énergie se produit indépendamment des pertes par les isolateurs.

Calcul d'une transmission triphasée. — Les développements dans lesquels nous sommes entré à propos des courants continus, nous permettent d'être bref. Il suffira, en effet, de procéder exactement de la même manière, mais en faisant usage des valeurs efficaces et tenant compte des décalages.

Soit à transmettre par courants triphasés une puissance

$$P = \sqrt{3}\, i_{eff} e_{eff} \cos\varphi, \quad \text{d'où} \quad i_{eff} = \frac{P}{\sqrt{3}\, e_{eff} \cos\varphi},$$

e_{eff} étant la tension entre les fils de ligne et i_{eff} l'intensité du courant qui les traverse.

Si R est la résistance d'un des fils de ligne, la perte par effet Joule sera

$$3Ri_{eff}^2 = \frac{RP^2}{e_{eff}^2 \cos^2\varphi}.$$

η_l étant le rendement que l'on s'impose pour la transmission, on a évidemment

$$\frac{RP^2}{e_{eff}^2 \cos^2\varphi} = P(1 - \eta_l), \quad \text{d'où} \quad R = \frac{e_{eff}^2 \cos^2\varphi(1 - \eta_l)}{P}.$$

De cette équation, on déduirait aisément la section d'un des trois fils de ligne et, par suite, le poids total de la ligne.

La résistance étant inversement proportionnelle à la section, on voit que cette dernière et, par suite, le poids de cuivre, sont inversement proportionnels au carré du cosinus du décalage.

Les trois fils de ligne sont généralement établis aux sommets d'un triangle équilatéral pour égaliser la selfinductance des trois phases dans la canalisation.

CHAPITRE XVI

DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE

Les distributions d'énergie électrique se répandent de plus en plus, parce qu'elles permettent de centraliser le matériel générateur, d'atteindre un rendement élevé et de ne consommer l'énergie que proportionnellement à la charge; leur arrêt et leur mise en marche sont faciles et instantanés; enfin elles n'exigent qu'une faible surveillance.

Nous rencontrons ici l'emploi des courants continus, alternatifs et polyphasés.

§ 1. — COURANT CONTINU.

INTENSITÉ CONSTANTE.

Récepteurs inertes ou mécaniques. — Les récepteurs sont tous montés en tension dans un circuit en forme de boucle (fig. 200), dans lequel les machines de l'usine entretiennent automatiquement une intensité constante. C'est évidemment le mode le plus simple de montage. Le même courant parcourant l'installation, la section et par suite le poids total du conducteur seront réduits à un minimum et le générateur pourra être inséré en un point quelconque du circuit.

FIG. 200.

A côté de ces avantages, le système présente l'inconvénient suivant : quand le conducteur d'alimentation est rompu, l'installation entière ne fonctionne plus. On y pare, dans une certaine mesure, en établissant plusieurs boucles pour desservir la même zone. De même, à cause d'une interruption accidentelle possible de leur circuit, les récepteurs d'une boucle sont dépendants l'un de l'autre. Il est donc utile de

prévoir un dispositif les mettant automatiquement en court-circuit dans ce cas.

Appelons R et r la résistance de la ligne et de chacun des récepteurs au nombre de n ; nous aurons

$$i = \frac{E}{R + nr}, \quad \text{d'où} \quad E = i(R + nr).$$

On voit que la tension croît rapidement avec le nombre des appareils d'utilisation.

On est donc conduit à de hauts voltages et, inconvénient le plus grave du système, toute l'installation, tant de ligne que d'appareil, doit être prévue et isolée pour le voltage maximum développé à pleine charge. C'est une cause de dépense élevée et un danger qui a fait écarter ce genre de distribution des applications domestiques. Mais il fournit une bonne solution pour des éclairages publics par arcs très étendus ou, mieux encore, pour la distribution de l'énergie mécanique.

Dans ce dernier cas : ou l'on utilise directement dans des sous-stations la puissance mécanique développée ; ou on y modifie les facteurs électriques des réceptrices au moyen d'un des transformateurs à courant continu étudiés précédemment, soit seul, soit conjointement avec une batterie d'accumulateurs.

En général, chaque boucle est alimentée par une génératrice spéciale qui forme une unité distincte et indépendante. La force électromotrice se règle à l'usine centrale par un appareil décalant automatiquement les balais, ou réduisant la vitesse angulaire du moteur, ou mieux modifiant l'excitation des génératrices. Les machines tant génératrices que réceptrices sont toutes du type série.

Récepteurs électrolytiques. — Au lieu de recueillir l'énergie dans les sous-stations au moyen de machines, on peut y installer des batteries d'accumulateurs que l'on chargera à régime constant, pendant la plus grande partie de la journée.

Aux heures de faible débit, les batteries absorbent presque tout le courant; aux heures de grande consommation, elles aident les machines de la centrale à satisfaire à la demande.

Chaque station possède deux adjoncteurs : un de charge, l'autre de décharge, de manière à permettre de régler à volonté le nombre d'éléments intercalés dans la boucle et la tension appliquée aux circuits secondaires d'utilisation.

Ce système est onéreux, à cause du coût élevé des accumulateurs, de leurs frais considérables d'entretien et de la transformation supplémentaire qu'exige l'énergie débitée par les batteries.

TENSION CONSTANTE.

Généralités. — Il importe qu'une distribution à tension constante satisfasse aux desiderata suivants : le potentiel doit être maintenu parfaitement régulier, quelles que soient les demandes variables de la consommation ; une indépendance aussi complète que possible, existera entre les différents appareils et groupes d'appareils; enfin le contrôle de la consommation et le réglage du potentiel en un point quelconque de l'installation, pourront s'effectuer de l'usine de production même.

Dérivation simple. — Les récepteurs sont groupés en dérivation sur deux conducteurs identiques et homogènes, raccordés à la source (fig. 201). On voit aisément que le courant total traversera les sections AC, BD. En CD, il est diminué de l'intensité i absorbée par le premier récepteur, de sorte que les sections suivantes CE, DF, n'ont plus à transmettre que le courant $I - i$; les sections EG, FH, le courant $I - 2i$ et ainsi de suite, les récepteurs étant supposés identiques.

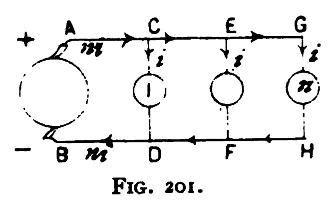


Fig. 201.

Si nous admettons dans les conducteurs d'alimentation la même densité que précédemment, on voit que l'on sera

conduit à des poids de cuivre beaucoup plus importants que dans le système à intensité constante. Par contre, l'indépendance des récepteurs est ici bien plus grande. L'un d'eux peut être interrompu, sans empêcher le fonctionnement des autres. L'indépendance n'est cependant pas absolue, attendu que la perte de charge produite dans les conducteurs d'alimentation augmente avec le nombre des récepteurs utilisés, ce qui réduit dans une proportion variable le potentiel disponible à leurs bornes.

Supposons, pour simplifier, n récepteurs, uniformément distribués, absorbant chacun le même courant et situés à la distance l l'un de l'autre. Le premier d'entre eux est aussi distant de l de la source. La résistance de deux conducteurs de longueur l et section s étant $\frac{2\rho l}{s}$, la perte de charge dans le premier tronçon sera $\frac{2\rho l}{s} ni$; celle dans le tronçon suivant $\frac{2\rho l}{s}(n-1)i$, et ainsi de suite jusqu'au dernier tronçon alimentant le n^e récepteur où nous perdrons $\frac{2\rho li}{s}$. La perte de charge totale sera la somme des pertes partielles :

$$\frac{2\rho li}{s}[n+(n-1)+\cdots+1]=\frac{2\rho li}{s}\,\frac{n+1}{2}n=\frac{n(n+1)\rho li}{s}.$$

Elle ne doit pas dépasser une valeur donnée ΔV, de sorte que la section s sera déterminée par l'équation

$$\frac{n(n+1)\rho li}{s}=\Delta V \quad \text{ou} \quad s=\frac{n(n+1)\rho li}{\Delta V}.$$

Le poids de cuivre des deux conducteurs d'alimentation ressortira conséquemment à

$$P=2nls\delta=\frac{2n^2(n+1)\rho l^2 i\delta}{\Delta V},$$

en appelant δ le poids spécifique du métal utilisé.

On remarquera que *le voltage appliqué aux bornes décroît du premier au dernier récepteur; la chute est maximum à pleine charge; le voltage remonte pour les récepteurs restant en activité au fur et à mesure qu'on réduit leur nombre, de*

manière à s'approcher d'autant plus du voltage de la source que leur nombre est plus restreint.

Câbles coniques parallèles. — Il n'est pas logique de donner aux deux conducteurs d'alimentation la même section d'un bout à l'autre, puisque l'intensité du courant va se réduisant graduellement jusqu'à l'extrémité. Supposons que la section soit diminuée régulièrement, de manière à maintenir constante la densité du courant. La section du premier tronçon sera s', celle du second $\frac{s'(n-1)}{n}$, celle du suivant $\frac{s'(n-2)}{n}$, ...

La chute de voltage dans le premier tronçon aura pour valeur $\frac{2\rho lni}{s'}$; celle dans le second tronçon

$$\frac{2\rho l(n-1)i}{\frac{s'(n-1)}{n}} = \frac{2\rho lni}{s'}, \quad \cdots$$

Chute totale :

$$n \cdot \frac{2\rho lni}{s'} = \frac{2\rho ln^2 i}{s'} = \Delta V, \quad \text{d'où} \quad s' = \frac{2\rho ln^2 i}{\Delta V}.$$

Le poids de conducteur sera

$$\begin{aligned} P' &= 2ls'\delta + \frac{2ls'(n-1)\delta}{n} + \frac{2ls'(n-2)\delta}{n} + \cdots + \frac{2ls'\delta}{n} \\ &= \frac{2ls'\delta}{n}[n + (n-1) + (n-2) + \cdots + 1] = (n+1)ls'\delta \\ &= \frac{2n^2(n+1)\rho l^2 i\delta}{\Delta V} = P. \end{aligned}$$

Il reste le même que dans le cas précédent, mais le fonctionnement de tous les récepteurs sera amélioré. En effet, si nous considérons le premier à partir de la source, la chute de voltage est ici

$$\Delta V'_1 = \frac{2\rho lni}{s'} = \frac{\Delta V}{n},$$

tandis qu'elle est dans le premier cas

$$\Delta V_1 = \frac{2\rho lni}{s} = \frac{2\Delta V}{n+1},$$

soit sensiblement le double.

L'adoption de câbles coniques parallèles permet donc de relever le voltage moyen sous lequel fonctionnent les récepteurs, mais le montage est plus difficile, à cause du grand nombre de sections différentes.

Câbles coniques antiparallèles ou montage en boucle. — Adoptons les mêmes conducteurs que dans le cas précédent, mais montons-les inversement (fig. 202) et revenons à la source par un conducteur possédant la section maximum.

Dans ces conditions, la perte de charge va être la même pour tous les récepteurs lorsqu'ils fonctionnent tous, puisque leur courant trouve partout la même section et suit le même parcours. C'est, en somme comme si chaque récepteur était relié à la source par deux conducteurs de mêmes longueurs et sections, les divers conducteurs voisins étant soudés l'un sur l'autre.

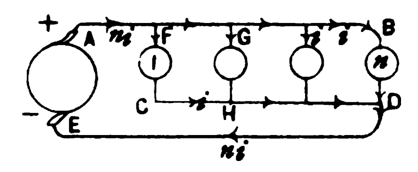


Fig. 202.

Le courant alimentant le premier récepteur emprunte n longueurs l, de conducteurs dont les sections sont respectivement.

$$s'', \quad \frac{s''}{n}, \quad \frac{s''2}{n}, \quad \ldots, \quad \frac{s''(n-1)}{n},$$

chargées des courants ni, i, $2i$, ... $(n-1)i$, puis le conducteur DE de longueur nl, de section s'' portant le courant total ni. La chute de potentiel affectant le premier récepteur sera

$$\frac{\rho lni}{s''} + \frac{\rho lni}{s''} + \frac{\rho ln2i}{s''2} + \ldots + \frac{\rho nlni}{s''} = \frac{n\rho lni}{s''} + \frac{\rho nlni}{s''} = \frac{2\rho ln^2i}{s''}.$$

Cette chute ne doit pas dépasser ΔV. Donc

$$\frac{2\rho l n^2 i}{s''} = \Delta V, \quad \text{d'où} \quad s'' = \frac{2\rho l n^2 i}{\Delta V}.$$

Quant au poids, il est aisé de voir qu'il sera

$$P'' = 2nls''\delta = 2nl\delta \cdot \frac{2\rho l n^2 i}{\Delta V} = \frac{4n^3 l^2 \delta\rho i}{\Delta V}.$$

En comparant au poids exigé par la dérivation simple, nous aurons

$$\frac{P''}{P} = \frac{2n}{n+1}.$$

Ce poids sera presque double. Mais si les récepteurs sont distribués de manière à former une boucle revenant au point de départ, alors le conducteur DE se réduit à une longueur l, de sorte que le rapport des poids devient simplement égal à l'unité.

Il convient toutefois de remarquer que, dans ce dernier cas, le montage en dérivation simple permettrait de résoudre le problème en dépensant moins de métal, puisqu'on utiliserait évidemment alors deux dérivations de longueur $\frac{nl}{2}$, alimentant chacune $\frac{n}{2}$ récepteurs.

En résumé, le montage en boucle permet d'obtenir une constance de voltage d'autant plus grande que l'on s'approche davantage de la pleine charge; mais le poids de cuivre utilisé est plus grand et les changements de section compliquent le travail de pose du circuit d'alimentation.

La constance de la densité du courant ne peut en général être assurée que d'une manière approximative, le commerce ne fournissant que des sections classées par demi-millimètres carrés : 0,5 ; 1 ; 1,5 ; ... millimètres carrés.

Applications. — I. *Un groupe de 16 lampes à incandescence, consommant 8 ampères, est situé à 125 mètres de la dynamo à 112 volts qui doit lui fournir le courant. Quelle sera la section minimum des conducteurs d'alimentation?*

Le bon fonctionnement des lampes à incandescence exige que les variations de voltage auxquelles elles sont soumises ne dépassent pas 3 °/₀. On pourra donc perdre à pleine charge, dans la canalisation, le voltage $\Delta V = 0{,}03 \,.\, 112 = 3{,}36$ volts.

Cette perte de charge est simplement égale à ir en appliquant directement la loi d'Ohm. Or, $r = \frac{\rho l}{s}$, ρ étant la résistance du conducteur exprimé en ohms-centimètres, l la longueur en centimètres du circuit et s sa section en centimètres carrés.

Nous devons faire une remarque préalable au sujet de l'application de cette formule. Il est plus pratique d'évaluer l en mètres, ce qui divise la résistance par 100, et d'exprimer s en millimètres carrés, ce qui la divise encore par 100, soit en tout par 10 000. Pour que sa valeur ne soit pas altérée par ce changement d'unités, il faudra multiplier le produit par 10 000. Or, les formulaires fournissent la valeur de ρ en ohms. Il suffira, pour obtenir la valeur exacte de r, de multiplier ρ par 10^6, c'est-à-dire de supposer que la résistivité est exprimée en microhms et d'en prendre le $^1/_{100}$, ce qui lui laissera la valeur 10 000 fois trop grande, nécessaire pour rétablir l'exactitude de la formule.

On admet en général $\rho = 1{,}8 \; 10^{-6}$, ce qui tient compte de l'échauffement des conducteurs. Nous aurons donc

$$\Delta V = \frac{\rho 2 l i}{s} \quad \text{ou} \quad s = \frac{\rho 2 l i}{\Delta V},$$

expression dans laquelle $\rho = 0{,}018$; $l = 125$; $i = 8$ et $\Delta V = 3{,}36$ d'où $s = 10{,}7$ millimètres carrés.

II. *Dresser le projet des canalisations nécessaires à l'éclairage électrique par dérivation simple d'un immeuble.*

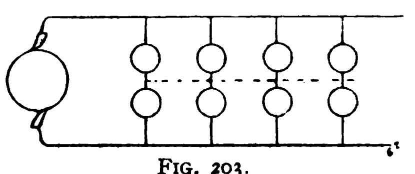
En principe, une canalisation mère partira du compteur ; sur cette canalisation seront greffés aux divers étages les circuits alimentant les lampes. Pour la facilité, on les groupera à des tableaux rassemblant tous les fusibles de l'étage.

On déterminera d'abord le nombre et l'emplacement des

foyers lumineux et on les reportera sur le plan des divers étages de l'immeuble. Si l'installation est soumise à un règlement, on tiendra compte des exigences auxquelles on doit satisfaire.

Généralement les sections inférieures à 1 millimètre carré ne sont pas admises, non plus que les densités de courant supérieures à 2A par millimètre carré. On groupera sur le même circuit les lampes situées dans les mêmes pièces ou les pièces contiguës suivant leur nombre. On calculera les sections d'après la densité maximum admise 2A par millimètre carré, ce qui sera en général suffisant. Puis on vérifiera, pour les lampes les plus éloignées du compteur, si la perte de charge se produisant quand tous les foyers sont en activité (obtenue en additionnant les pertes rencontrées dans les divers tronçons empruntés) ne dépasse pas la limite permise, auquel cas on majorerait la section de certains tronçons, de manière à arriver au résultat.

Dérivation avec récepteurs en série. — Lorsque les récepteurs sont calibrés pour un voltage sous-multiple de celui de la source et que leur fonctionnement n'influence pas celui des voisins, comme c'est le cas pour certaines lampes à arc, on les monte par séries égales (fig. 203) en dérivation sur les conducteurs d'alimentation. On obtient ainsi une combinaison mixte de la dérivation et du système série.


Fig. 203.

L'inconvénient du montage en série persiste toutefois : si un des récepteurs vient à être interrompu, il paralyse complètement le fonctionnement de son branchement. On y remédie en adoptant un dispositif automatique remplaçant l'appareil détérioré par un autre, ou par une résistance équivalente. Mais ceci constitue une complication. On se contente souvent de réunir les bornes de mêmes polarités par des câbles intermédiaires. Dans ces conditions, l'interruption d'un recepteur provoque simplement une

perturbation dans le fonctionnement des autres et non leur arrêt.

Système à trois fils. — Comme l'a montré Hopkinson, une indépendance presque complète peut être obtenue en associant deux générateurs en tension et reliant les câbles intermédiaires aux pôles communs des machines (fig. 204).

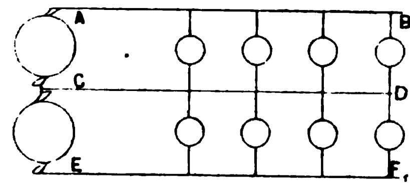


FIG. 204.

Si les récepteurs sont égaux et fonctionnent simultanément, aucun courant ne traverse le conducteur intermédiaire ou neutre CD. Si tous les récepteurs sont interrompus d'un côté (dans un pont), le conducteur extrême correspondant devient inactif et est remplacé par le conducteur CD.

Le système, comme on le voit immédiatement, n'exige, pour alimenter le même nombre de récepteurs, que la moitié du courant requis par le système bifilaire, puisque c'est le *même* courant qui traverse deux récepteurs successifs. Si S est la section des conducteurs du système bifilaire et a leur coût par unité de volume, leur dépense d'achat sera $2SLa$, L étant la longeur totale des canalisations, gouvernée par la position des appareils d'utilisation extrêmes.

Puisqu'il passe moitié moins de courant avec le système à trois fils, ses conducteurs peuvent avoir, à même densité de courant, une section moitié moindre. Leur coût sera donc $3 . \frac{S}{2} La$. L'économie effective par rapport au système bifilaire sera ainsi $2LSa - \frac{3}{2} SLa$, et l'économie relative

$$\frac{2SLa - \frac{3}{2} SLa}{2SLa} = \frac{4-3}{4} = \frac{1}{4} \text{ ou } 25\ \%. \qquad (1)$$

En réalité, l'économie peut devenir plus grande, car il est toujours possible d'étudier les groupements de manière que le même nombre de récepteurs ou à peu près, reste simul-



tanément en service de chaque côté du fil neutre. On peut dès lors, sans inconvénient, donner à ce dernier une section moitié de celle des autres.

Dans l'équation (1), au lieu de 3 nous aurons donc 2,5 et l'économie relative devient

$$\frac{4 - 2,5}{4} = \frac{1,5}{4} = 37,5 \text{ °/}_{\circ}.$$

Tout ceci est établi dans l'hypothèse où la densité du courant reste la même que dans le système bifilaire de comparaison, c'est-à-dire que la chute de voltage garde la même valeur. Une chute de voltage $\frac{\rho 2 l i}{s}$, ne varie pas en effet, pour une longueur donnée, tant que la densité $\frac{i}{s}$ reste constante. Mais, puisque nous disposons ici d'une tension double, la perte de voltage consentie peut, sans inconvénient, être double également, ce qui nous permettra d'opérer une nouvelle réduction de section de moitié.

Pour calculer l'économie que ceci représente, il suffira de remplacer dans l'équation (1), 3 par $\frac{3}{2}$. L'économie monte à

$$\frac{4 - \frac{3}{2}}{4} = \frac{5}{8} = 62,5 \text{ °/}_{\circ},$$

et si nous diminuons aussi de moitié la section du conducteur intermédiaire, au lieu de $\frac{3}{2}$ il faut $\frac{5}{4}$, de sorte que l'économie atteint

$$\frac{4 - \frac{5}{4}}{4} = \frac{11}{16} = 68,75 \text{ °/}_{\circ}.$$

On a l'habitude de mettre le fil neutre à la terre, afin de limiter au voltage d'un seul des ponts la différence de potentiel pouvant se produire entre un point quelconque des circuits et la terre.

L'emploi de machines montées en tension présente des difficultés de réglage; l'encombrement est considérable, la surveillance devient plus difficile et l'entretien plus onéreux.

On élude ces inconvénients en utilisant des dynamos uniques à voltage double, mais il faut alors prévoir une disposition qui rétablisse ou permette de rétablir l'égalité du voltage dans les deux ponts lorsqu'ils sont inégalement chargés.

Compensateur. — On monte en dérivation sur les conducteurs extrêmes (fig. 205), un *compensateur* constitué par une dynamo en dérivation possédant deux induits D_1, D_2 montés sur le même arbre et connectés en série. Les balais adjacents sont réunis au fil neutre. E est la dynamo de voltage double, en rapport avec les conducteurs extrêmes.

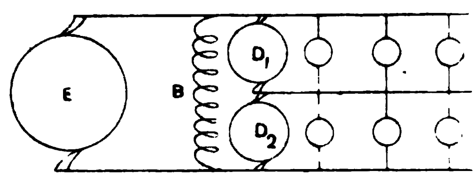


Fig. 205.

Quand le voltage est le même sur les deux ponts, les induits, traversés par le même courant, fonctionnent comme moteurs. Leur consommation est minime, puisqu'ils marchent à vide.

Dès qu'un déréglage se produit, l'induit auquel est appliqué le plus grand voltage continue à fonctionner comme moteur; mais il tourne plus vite et entraîne l'autre dont la force électromotrice s'élève, l'excitation étant restée la même. Dès lors, le second induit fonctionne comme dynamo; il débite son courant dans le pont le plus chargé, et une certaine compensation, dont nous allons évaluer l'importance, se produit.

Efficacité du compensateur. — Soient V et V′ les voltages des deux ponts au moment où *n* récepteurs inertes d'une résistance de R ohms fonctionnent dans le premier et *n′* seulement dans le second; *r* la résistance de chacun des induits; *e* la force électromotrice engendrée dans chacun d'eux par leur rotation dans le champ indépendant créé par l'enroulement dérivé entre les fils extrêmes.

Écrivons que le courant entrant dans le pont supérieur au point de jonction du conducteur supérieur et du premier balai est égal à celui qui sort du second pont au point de

jonction du conducteur inférieur et du dernier balai, pour rentrer dans la génératrice E :

$$\frac{V - e}{r} + \frac{V}{\frac{R}{n}} = \frac{V' - e}{r} + \frac{V'}{\frac{R}{n'}}.$$

Éliminons V′ au moyen de la relation : $E = V + V'$,

$$V = E \frac{1}{1 + \frac{rn + R}{rn' + R}}.$$

Pour que le réglage soit bon, il faut que la fraction

$$\frac{1}{1 + \frac{rn + R}{rn' + R}}$$

diffère de ½ d'une quantité inférieure à la variation de voltage tolérable. Par exemple, s'il s'agit de lampes à incandescence, il faudra que

$$\frac{E}{2} - \frac{E}{1 + \frac{rn + R}{rn' + R}} \leqslant 0{,}03 \; \frac{E}{2},$$

quelles que soient les valeurs que le fonctionnement de l'installation assigne à n et n'. Dans une installation déterminée, R est connu; on connaît également les valeurs extrêmes que peuvent prendre n et n'; l'équation précédente limitera la résistance r des induits qui doit être le plus faible possible.

Supposons, pour fixer les idées, $r = 0{,}05$ et $R = 200$ O, avec $n - n' = 100$ au maximum, on aura :

pour $n' = 1\,100$ et $n = 1\,000$ (nombres maxima de récepteurs utilisés) . . . . $V = E \,.\, 0{,}505$,

pour $n' = 100$ et $n = 0$. . . . . $V = E \,.\, 0{,}506$,

soit, si $E = 220$, les valeurs respectives de 111 et 111,3 V.



Lorsque le compensateur est à l'usine, on pourra le constituer de deux dynamos distinctes, semblables, rigidement accouplées, ayant chacune leur excitation propre (prise sur les conducteurs extrêmes), ce qui permettra de modifier celle-ci de manière à tenir compte des chutes de voltage se produisant dans les conducteurs d'alimentation. Si le compensateur est dans le réseau, en un endroit dépourvu d'une surveillance constante, il conviendra d'utiliser une machine unique, à double enroulement induit et dont les collecteurs sont séparés, laquelle présentera l'avantage d'avoir une réaction d'induit très faible, parce que les courants du moteur et du générateur y circulent en sens inverse.

ACCUMULATEURS. — En plaçant en dérivation entre les deux ponts une batterie d'accumulateurs, et réglant le nombre d'éléments insérés de part et d'autre, on pourra également rétablir l'équilibre à volonté. Mais les accumulateurs exigent une grande surveillance et un entretien constant.

Système à cinq fils. — L'économie de conducteur très notable, obtenue avec le système trifilaire, peut encore être accentuée par l'emploi de 4, 5, ... fils. Mais la complication naît. En outre, l'isolement de plus en plus parfait, qu'il faut donner aux conducteurs, limite à 5 fils le maximum pratique atteint jusqu'ici. A plus forte raison que dans le cas précédent le fil médian devra être mis à la terre, et des compensateurs égaliseront le voltage entre les divers ponts.

Distribution par réseau et artères. Généralités. — Quel que soit le mode de groupement adopté, on se trouve rapidement limité par la nécessité de ne pas dépasser la chute maximum admissible de tension. Pour arriver à desservir de grands espaces, il est nécessaire d'assurer la constance du voltage en un certain nombre de points N, N, ... (fig. 206) appelés *centres de distribution*. On conduira de ces points, par des canalisations longeant les rues, des distributeurs D, D, ... sur lesquels se raccorderont les *branchements* d'abonnés B, B,... Afin d'éviter que des branchements ne soient paralysés par la rupture d'un des distributeurs, on réunira ceux-ci partout

où ils passent à proximité l'un de l'autre. Un véritable *réseau* se trouve ainsi constitué, que l'on alimente au moyen d'*artères*

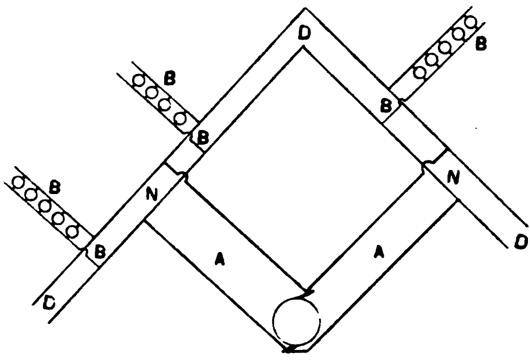


FIG. 206.

ou de *feeders* A, A, ... aboutissant dans les boîtes de distribution installées de préférence au croisement des rues.

Si les artères ont été convenablement calculées, de manière que la perte de charge soit la même dans chacune d'elles, on pourra les raccorder aux mêmes machines à l'usine et les centres de distribution resteront tous au même potentiel. Ils correspondent, en somme, à autant de petites usines secondaires déversant sous pression constante l'énergie dans leurs environs.

On saisit dès lors le jeu du système. Pourvu qu'on puisse l'égaliser de tous côtés, la perte de charge dans les artères pourra être quelconque et très élevée, ce qui accroît considérablement la distance à laquelle peut se trouver l'usine centrale et par conséquent le rayon et l'efficacité de la distribution.

Pour régler la perte de charge dans les artères, et ainsi arriver à maintenir le voltage constant dans les boîtes de distribution, il faut pouvoir le connaître à chaque instant en ces points. On obtient ce résultat en soudant aux points de raccordement des artères avec les distributeurs, de minces fils isolés dits *pilotes*, posés dans les canalisations à côté des

artères et venant aboutir à l'usine à un ou plusieurs voltmètres.

Calcul des sections. — S'il s'agit d'une distribution d'éclairage, les sections pourront être déterminées en consentant par exemple à une perte de 1 °/₀ dans les canalisations intérieures (branchements) et 2 °/₀ dans les distributeurs. A Bruxelles, on admet une perte de 2 °/₀ dans les branchements jusqu'à la lampe la plus éloignée. Afin de faciliter la pose, la section des distributeurs est laissée constante en général.

Nombre d'artères. — Il y a intérêt de multiplier le nombre d'artères. En effet, si leur nombre est faible, les distributeurs sont longs et la valeur de la perte $u = \frac{\rho 2 l i}{s}$ montre que, pour maintenir cette perte constante, il faut augmenter la section proportionnellement à la longueur. On a d'ailleurs pour le poids : $p = 2sl\delta = \frac{4\rho l^2 \delta i}{u}$, formule montrant que le poids des distributeurs croît proportionnellement au carré de leur longueur ou de la distance séparant les boîtes de distribution.

Au contraire le poids des artères est à peu près indépendant de leur nombre, puisque la quantité d'électricité qui les traverse reste la même, ainsi que leur longueur moyenne. Supposons que nous alimentions au moyen d'une seule artère de longueur L et de section S traversée par le courant total I. La perte $U = \frac{\rho 2 LI}{S}$ d'où la section $S = \frac{\rho 2 LI}{U}$. Si au lieu d'une artère nous en utilisons deux, elles ne devront livrer individuellement passage qu'au courant $\frac{I}{2}$ et leur section pouvant être moitié moindre, leur poids total reste le même.

Réglage de la tension. — Au point de vue de la conduite facile et économique de l'usine centrale, il est essentiel de pouvoir faire fonctionner toutes les machines, en dérivation sur les mêmes barres de distribution.

1° Dans un premier système, *on maintient la tension constante à la fois dans l'usine et dans le réseau.*

On doit, pour cela, disposer d'un nombre suffisant d'artères d'égale résistance, qui sont mises en service au fur et à mesure des besoins. La surveillance des machines est ainsi réduite à un minimum, mais le rendement général est faible,

puisqu'il reste le même à charge réduite aussi bien qu'à pleine charge.

2° Le système le plus usité consiste à *se réserver la possibilité de modifier la chute de tension dans toutes les artères, en y insérant des résistances réglables.*

Celles-ci sont avantageusement composées de tôles en maillechort, nickeline, etc., ou affectent la forme de toiles métalliques. On peut aussi les constituer de fils réunis en quantité et dont on fait varier le nombre.

La manœuvre de ces rhéostats se fera suivant les indications fournies par les fils pilotes.

Pour éviter l'emploi d'un trop grand nombre de voltmètres, on pourra réunir tous les fils pilotes de même polarité sous la même borne d'un seul grand voltmètre général, qui fournira le voltage moyen de tous les centres de distribution.

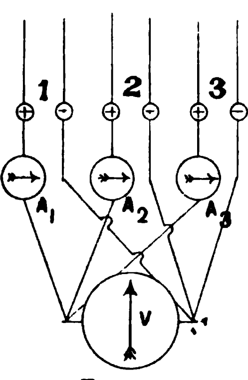


Fig. 207.

Au besoin, des résistances seront intercalées dans les fils de jonction, pour éviter l'échange de courants trop intenses, entre des distributeurs dont le potentiel peut varier de quelques volts. Le voltmètre général ne donne toutefois, dans ces conditions, qu'un voltage moyen, pouvant résulter de voltages présentant des différences inadmissibles. Il sera donc utile d'insérer dans les fils pilotes de même nom, de petits ampèremètres A_1, A_2, A_3, ... (fig. 207), à graduation symétrique autour du zéro, lesquels, d'après le sens de la déviation de leur aiguille, indiqueront comment on doit manœuvrer les rhéostats d'artères. Quand l'installation fonctionnera régulièrement, les ampèremètres devront tous rester au zéro.

Au fur et à mesure de l'accroissement de la demande, le voltage sera élevé à l'usine par le manœuvre des rhéostats de champ des machines, de manière à faire donner au voltmètre général une indication constante. D'autre part, l'examen des ampèremètres permettra de modifier les rhéostats

d'artères, de manière à maintenir partout l'égalité du voltage.

Limite du rayon de distribution. — Remarquons qu'avec l'augmentation de longueur des artères : 1° leur prix s'élève ainsi que leur coût d'amortissement; 2° la chute de voltage U à laquelle on doit consentir devient plus grande ainsi que l'énergie dissipée UI. Ce sont ces dépenses qui, augmentant proportionnellement à la longueur et à son carré, limitent rapidement le rayon de distribution.

Position de l'usine (*). — Le poids d'une artère $p = 2Sl\delta$ prend, si l'on y remplace S par sa valeur tirée de l'équation donnant la perte de charge

$$U = \frac{\rho 2lI}{S}, \quad \text{la forme :} \quad p = \frac{4\rho l^2 \delta I}{U} = Kl^2 I.$$

Une seconde artère exigera le poids $p' = Kl'^2 I'$, et ainsi de suite, de sorte que le poids total sera un terme $P = K\Sigma l^2 I$ tout à fait analogue à l'expression du moment d'inertie en mécanique. Or, on sait que le moment d'inertie est minimum pour le centre de gravité du système, et présente la même valeur pour tous les points également distants de ce centre. On en conclut : *Le meilleur emplacement pour une source de courant est le centre de gravité des récepteurs ; tous les emplacements équidistants de ce centre sont équivalents.* La masse des récepteurs est représentée par le courant qu'ils absorbent.

Si l'on établit l'usine de toutes pièces, en ayant une connaissance complète des besoins à satisfaire, on l'installera donc le plus près possible de ce centre de gravité. On sera ainsi amené, tout au moins pour les usines dont l'éclairage constitue la principale ressource, à se fixer au centre d'agglomérations denses, où le terrain coûte cher. On réduira la

---

(*) G. L'Hoest, *Choix de l'emplacement d'une usine dans une installation en dérivation avec perte de charge constante dans les circuits dérivés.* (Bulletin Montefiore, t. I de 1890, p. 45.)

dépense, en reportant l'usine génératrice hors ville, et ne laissant à l'endroit le plus favorable qu'une sous-station de transformation alimentée au moyen de courants de haute tension venant de l'extérieur.

§ 2. — COURANTS ALTERNATIFS ET POLYPHASÉS.

L'emploi des transformateurs permet d'étendre à des distances considérables l'action des usines de distribution, en raison des hautes tensions qu'ils permettent d'adopter.

Le système le plus parfait consiste à distribuer l'énergie au moyen d'un réseau à haute tension alimenté par des artères, et sur lequel se dérivent des transformateurs réduisant le voltage à la valeur voulue, aux points d'utilisation. En raison des fortes pressions que l'on peut admettre, et des faibles chutes de voltage qui en résultent, le réseau sera souvent réduit aux simples artères, sur lesquelles viendront se dériver les transformateurs.

Transformateurs isolés. — L'emploi de transformateurs isolés permettra de mieux les répartir aux centres de consommation. Les circuits secondaires, qui peuvent être montés à deux ou à plusieurs fils, dans le cas de l'alternatif simple, seront eux-mêmes isolés l'un de l'autre pour chaque transformateur, ou tous raccordés entre eux de manière à former un réseau secondaire. Le premier système a l'avantage de localiser l'effet d'un dérangement aux récepteurs d'un seul appareil; le second uniformise mieux la tension.

Transformateurs groupés. — Dans le cas que nous venons d'examiner, les bobines primaires restant continuellement en dérivation sur le réseau à haute tension, il en résulte une perte par hystérésis, courants de Foucault et effet Joule, très faible, mais constante. On peut l'éviter en groupant les transformateurs dans des sous-stations dont le personnel ne mettra les diverses unités en service qu'au fur et à mesure des besoins, de manière à bénéficier autant que possible des avantages de la pleine charge pour les appareils qui débitent.

Nature du courant à adopter. — Si l'on a principalement en vue l'éclairage, le courant alternatif se recommande spécialement par sa grande simplicité.

Mais lorsqu'il faut se préoccuper de fournir de l'énergie mécanique, les courants polyphasés s'imposent par les qualités précieuses de leurs moteurs : démarrage sous charge, couple moteur constant, entretien et surveillance presque nuls.

Au point de vue de la constitution des réseaux secondaires, les courants diphasés, employés avec un fil de retour, présentent plus de simplicité que les triphasés, puisqu'on peut grouper les récepteurs sur deux circuits seulement, par un montage à trois fils, au lieu des trois circuits à équilibrer, qu'exigent les seconds.

Fréquence. — Quant à la périodicité des courants, comme les grandes fréquences sont favorables pour l'éclairage, mais désavantageuses pour les moteurs, on adopte aujourd'hui des fréquences intermédiaires de 40 à 60 périodes, avec tendance d'admettre d'une manière générale leur moyenne 50.

CHAPITRE XVII

ÉCLAIRAGE (*)

§ 1. — INCANDESCENCE.

Production des radiations lumineuses. — Lorsque l'on élève graduellement, par effet Joule, la température d'un corps conducteur à haute température de fusion, on constate, à partir d'un certain point, l'émission de rayons lumineux. D'abord très faible et rougeâtre, la lumière émise se renforce, passe au rouge vif, puis au blanc éblouissant; enfin, si l'incandescence est encore poussée plus loin, le métal fond ou se volatilise.

L'impression physiologique que donne la lumière est, comme on sait, provoquée par des vibrations transversales extrêmement rapides de l'éther. Ces vibrations sont de diverses fréquences. En faisant traverser un prisme de verre par un pinceau de lumière blanche, celle-ci s'étale suivant un spectre coloré où l'on retrouve la gamme des couleurs de l'arc-en-ciel, depuis le rouge qui correspond à des vibrations de 480 trillions par seconde jusqu'au violet, 704 trillions. Au delà s'étend toute une bande de radiations qui se manifestent par des actions chimiques telles que la décomposition des sels d'argent. Le nombre de vibrations y augmente encore.

En résumé, par l'élévation graduelle de la température, des radiations calorifiques se développent d'abord, auxquelles viennent s'ajouter ensuite successivement et en quantités de

(*) André Blondel, *Les progrès des lampes électriques.* (Rapports et procès-verbaux du Congrès international d'électricité de 1900, p. 210. Paris, Gauthier-Villars.)

plus en plus notables au fur et à mesure que le degré d'incandescence augmente, des radiations lumineuses, puis actiniques.

Les vibrations perceptibles à l'œil sont exclusivement comprises entre les deux limites que nous venons d'indiquer. Au point de vue de l'éclairage, ce sont celles-là seules qu'il est intéressant de développer, à l'exclusion des autres, puisque ces dernières correspondent à de l'énergie inefficacement dépensée.

Les procédés d'éclairage les plus avantageux sont conséquemment ceux dans lesquels on dégage le moins de ces radiations accessoires. Or, c'est précisément une des caractéristiques de l'éclairage électrique. Par exemple, l'énergie dépensée pour produire la flamme d'une bougie de stéarine est d'environ 86 watts, tandis qu'une lumière équivalente sera produite au moyen d'un arc électrique en dépensant seulement 0,7 de watt.

Qualités des corps à utiliser. — Les corps qu'il est possible d'utiliser devront avoir un point de fusion très éloigné de l'incandescence blanche; garder une grande résistance mécanique aux hautes températures; présenter une résistance électrique élevée, de manière à développer un grand effet Joule spécifique. On les façonne généralement sous forme d'un cylindre long et mince, recourbé en ovale, en boucle ou spirale.

Emploi du carbone. — Le carbone a été le plus employé jusqu'ici. Il est très difficilement fusible, peu conducteur, solide, mais présente l'inconvénient de brûler à l'air libre; aussi y a-t-il lieu de l'enfermer dans une ampoule privée d'air. Celle-ci se monte sur un culot métallique composé de deux pièces isolées C_1, C_2 (fig. 208), avec lesquelles les deux bouts du filament sont mis en rapport et qui permettent son insertion dans le circuit.

Fabrication des lampes. — La fabrication des lampes comporte les opérations suivantes : 1° façonnage et carburation du filament; 2° son montage dans l'ampoule; 3° extrac-

tion de l'air; 4° étalonnage; 5° montage de la lampe sur son culot.

1° FAÇONNAGE DU FILAMENT. — On obtient les filaments de divers diamètres, en carbonisant à l'abri de l'air des fils de cellulose. Celle-ci, préparée à l'état de pâte, est tréfilée, puis enroulée et séchée sur des tambours en bois. Pour en opérer la carbonisation, les fils de cellulose sont enroulés sur des gabarits en charbon qui leur donnent les diverses formes requises (simple, double ou triple boucle, fer à cheval, etc); on enferme ces gabarits dans des creusets en terre réfractaire et les interstices sont bourrés de poussier de charbon pour empêcher l'accès de l'air. Un couvercle, également en terre réfractaire, est ensuite luté sur chacun des creusets que l'on porte dans un four chauffé à 1 500°, où ils séjournent vingt-quatre heures. Les filaments de cellulose sont alors transformés en carbone. On les sépare des gabarits et on mesure au micromètre leur diamètre, qui varie entre trois et cinquante centièmes environ de millimètre.



FIG. 208.

L'opération de la carburation, encore appelée *renforcement* ou *nourrissage*, a pour but de rendre plus homogène le filament, en le revêtant d'une couche de carbone brillant, qui possède, en outre, un pouvoir émissif notablement plus grand que la surface terne primitive. A cet effet, le filament est plongé dans un hydrocarbure gazeux, puis porté à l'incandescence. L'hydrocarbure se décompose et son carbone se dépose à la surface du filament. Les sections les plus minces de celui-ci étant les plus résistantes, il s'y développe plus de

chaleur, la précipitation y est plus active, d'où uniformisation de la section. On arrête l'opération quand le filament a atteint la résistance voulue.

2° MONTAGE DANS L'AMPOULE. — Il faut maintenant le munir de deux conducteurs métalliques qui le soutiendront dans l'ampoule et permettront de lui envoyer le courant de l'extérieur.

Ces conducteurs doivent traverser le verre, ce qui soulève une grosse difficulté provenant de la différence des coefficients de dilatation des deux matières, en exposant à des fêlures et des rentrées d'air. Le platine seul, ayant un coefficient de dilatation très voisin de celui du verre, convient. Mais comme il coûte fort cher, il importe de le réduire au strict nécessaire; aussi ne l'utilise-t-on que pour la traversée du cristal. On le prolonge, à l'extérieur de l'ampoule, par un fil de cuivre venant se souder au culot de la lampe et, à l'intérieur, par un fil de nickel tubé à son extrémité pour recevoir la branche correspondante du filament. Les trois métaux : cuivre, platine et nickel, soudés dans cet ordre les uns aux autres, sont introduits par paires dans de petits tubes en cristal dont on évase une des extrémités au chalumeau, tandis que l'on fond l'autre pour la pincer autour des deux parties en platine. Le filament est monté en introduisant chacune de ses branches dans la partie tubée correspondante des conducteurs; on le soude à l'aide d'une pâte spéciale à base de goudron, puis les attaches sont séchées à l'étuve. Il n'y a plus qu'à introduire le filament et son support dans l'ampoule, l'y souder et munir cette dernière, à l'extrémité opposée à la soudure, d'un tube par lequel se fait le vide.

3° EXTRACTION DE L'AIR. — L'extraction de l'air s'effectue en général à l'aide de pompes à mercure du type de la pompe Sprengel et parfois en mettant en œuvre des moyens chimiques. Pour reconnaître si le vide est parfait, on reproduit avec l'ampoule l'expérience des tubes de Geissler. A cet effet, on la met en communication avec les pôles d'une bobine de Ruhmkorff; si le vide est bon, il n'y a pas d'effluve; le contraire a lieu si l'ampoule contient des traces d'air.

4° ÉTALONNAGE. — Les lampes reconnues bonnes sont soumises à divers essais de contrôle, puis étalonnées une à une au photomètre.

5° MONTAGE SUR LE CULOT. — Enfin, on lute au plâtre le culot sur le col de l'ampoule et on soude les deux bouts de cuivre sur les pôles du culot.

Divers modes d'attache des lampes. — Indépendamment des formes du filament et de l'ampoule, et du voltage spécial pour lequel elles sont calibrées, les lampes à incandescence se différencient par le mode d'attache de leur culot dans le support en cuivre ou laiton, dénommé *socket.*

LAMPE EDISON. — Le culot Edison (fig. 208) est un des plus employés. Il se visse dans un socket présentant en creux la même forme et déjà étudié à propos des fusibles.

LAMPE SWAN. — Dans la lampe Swan (fig. 209), les électrodes métalliques extérieures de l'ampoule, recourbées en œillets, viennent s'attacher à deux crochets. Les contacts sont assurés par un ressort à boudin qui tend à écarter l'ampoule de son support.

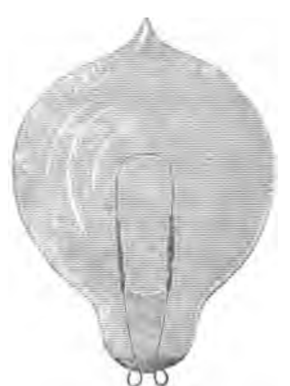


FIG. 209.

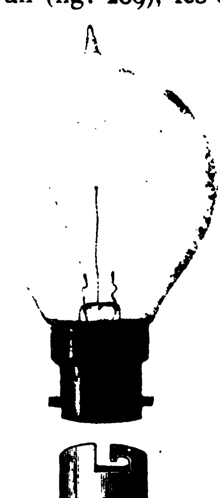


FIG. 210 et 211.

FERMETURE A BAYONNETTE (fig. 210 et 211). — Le culot porte diamétralement deux goupilles que l'on engage dans les rai-

nures du socket. Lorsque les goupilles sont arrivées à fond de course, on fait effectuer au culot une certaine rotation, de manière à caler les goupilles dans les retours des bayonnettes. Les extrémités du filament se rattachent à deux électrodes sur lesquelles viennent presser avec force deux ressorts en rapport avec les conducteurs de la canalisation, lorsque le culot est attaché.

Lampes portatives. — Les lampes portatives se montent sur un fil souple dont les conducteurs sont fixés à des fiches F_1, F_2 (fig. 212), fendues longitudinalement pour les rendre plus élastiques; on les insère dans les cylindres métalliques creux d'une *prise de courant* rattachée, d'autre part, aux conducteurs d'alimentation.

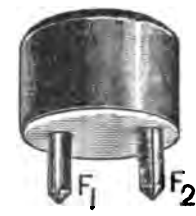


Fig. 212.

Intensités lumineuses et voltages. — On trouve des lampes incandescentes de toutes dimensions dont l'intensité lumineuse varie d'une faible fraction de bougie (usages médicaux, exploration des cavités internes) à cent bougies décimales. Les plus usuelles donnent 5, 10, 16, 25, 32, 50 bougies. Les voltages pour lesquels on les calibre peuvent être quelconques : depuis 1 et 2 volts jusqu'à 250. Les tensions usuelles sont 100, 110 et, depuis quelques années, 220 et 250 volts.

Dimensions des filaments. — Au fur et à mesure que le voltage appliqué à la lampe s'élève, le filament devient plus long et plus mince. Il est alors nécessaire de le supporter spécialement; la figure 210 en montre un exemple. Pour les voltages de 220 à 250 volts, on place souvent deux filaments en tension. Dans les lampes de tramways, où il faut aussi parer à l'effet destructif des vibrations, le filament s'attache par une ou deux pattes en verre au sommet de l'ampoule.

Variation de la consommation spécifique avec le voltage et l'intensité lumineuse. — On remarque que les lampes incandescentes alimentées à bas potentiel ont une consommation spécifique moindre que celles marchant sous haut voltage. Par exemple, alors que la consommation des lampes

ordinaires de 16 bougies atteint 3,6 watts par bougie sous 200 volts, elle s'abaisse à 2 watts par bougie sous 30 volts.

La raison de cette réduction réside dans ce fait que les lampes à bas voltage, donc à courant intense, ont un filament épais et court, se refroidissant moins fortement que le filament long et mince des lampes à haut voltage.

Pour le même motif, à égalité de voltage, les lampes de faible intensité lumineuse consomment proportionnellement plus que les autres. La température atteinte par le filament est d'environ 1 600°.

Coût de l'éclairage par incandescence. — Les lampes de 16 bougies coûtent actuellement, prises en gros, environ 0,55 fr. On en distingue deux espèces : celles dites de *longue durée* consommant 3,5 watts par bougie et durant 800 heures; celles dites de *faible consommation*, n'exigeant que 2,5 watts par bougie, dont la durée peut être évaluée à 400 heures environ.

On peut aisément se rendre compte qu'il est toujours avantageux d'utiliser les lampes *poussées* ou à faible consommation spécifique.

Le coût d'une heure d'éclairage avec celles-ci ressort en effet à

$$P = \frac{0,55}{400} + \frac{2,5 \cdot 16}{100} p = 0,001\,375 + 0,4\,p,$$

p étant le prix de l'hectowatt-heure.

Le coût d'une heure d'éclairage avec la lampe de longue durée revient à

$$P' = \frac{0,55}{800} + \frac{3,5 \cdot 16}{100} p = 0,000\,688 + 0,56\,p.$$

La différence $P' - P = 0,16\,p - 0,000\,687$ sera positive, c'est-à-dire que les lampes de longue durée seront plus coûteuses que les autres, tant que $0,16\,p - 0,000\,687 > 0$ ou $p > 0,0043$ fr., et, avec les coefficients admis ci-dessus, le coût de l'éclairage sera le même pour les deux catégories de lampes, quand $p = 0,0043$ fr.

Ce prix est tellement bas, qu'il n'a pas encore été atteint

jusqu'ici. Dans les installations hydraulico-électriques le plus privilégiées, l'hectowatt-heure revient à 0,005 fr; il est vendu à peu près dix fois plus cher dans les agglomérations, de sorte qu'on peut dire qu'il y a toujours un grand intérêt à utiliser les lampes de faible consommation spécifique.

Lampe Auer. — Cet intérêt se trahit par les efforts que font les inventeurs, pour abaisser la consommation spécifique. En remplaçant le charbon par de l'osmium, qui peut supporter sans détérioration des températures très élevées, le docteur Auer a pu produire la bougie décimale en dépensant 1,5 watt seulement; mais ses appareils n'ont pas encore paru d'une manière courante sur le marché.

La lampe à osmium donne, paraît-il, une lumière extraordinairement belle et d'un blanc très pur. En outre, son pouvoir lumineux baisserait fort peu avec le temps, ce qui la différencierait très avantageusement des lampes à filament de carbone.

Lampe Nernst. — M. Nernst est arrivé à une consommation de 1,8 watt pour les lampes de 16 bougies, à 1,5 pour celles de 160 bougies et au-dessus, en employant des oxydes réfractaires tels que la magnésie. Ces corps n'étant pas conducteurs à la température ordinaire, il faut les chauffer préalablement, d'où nécessité d'un allumage spécial, obtenu soit à la main, soit automatiquement au moyen d'une spirale de platine éliminée ensuite du circuit. Comme la résistance de la pâte d'oxydes décroît rapidement avec l'élévation de la température, ce qui entraînerait de grandes variations de puissance lumineuse dès que le voltage se modifie, il est nécessaire de disposer en série avec le filament une résistance métallique (dont la résistance augmente au contraire avec le degré thermique) à fort coefficient de température, de manière à empêcher un trop rapide accroissement du courant, quand la tension augmente. La lampe Nernst brûle à l'air libre.

Mise en activité des lampes. — Les lampes à incandescence sont en général alimentées en dérivation et com-

mandées individuellement au moyen d'un petit interrupteur soit séparé, soit fixé dans le socket de la lampe (fig. 213, 214), poignée A.

Lorsqu'elles sont groupées, leur mise en activité peut donner lieu à quelques problèmes intéressants, que nous passerons rapidement en revue.



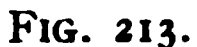

FIG. 213.



FIG. 214.

COMMANDE DE PLUSIEURS POINTS. — Il est souvent utile de pouvoir commander un groupe de lampes d'un ou de plusieurs points. Les figures 215 et 216 montrent deux types d'interrupteurs permettant d'arriver au résultat. Quelle que soit l'orientation donnée à l'un d'eux, l'autre coupe le circuit dans une de ses positions et le ferme dans l'autre.

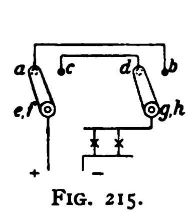


FIG. 215.

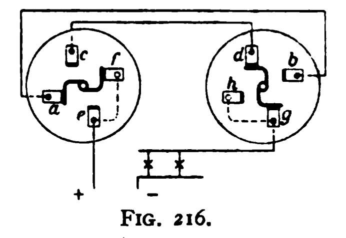


FIG. 216.

COMMANDE ALTERNATIVE DE DEUX GROUPES. — Pour commander un groupe ou un second groupe à volonté (fig. 217, 218), la lame pivotante *ac* de l'interrupteur peut prendre quatre positions : dans la situation indiquée,

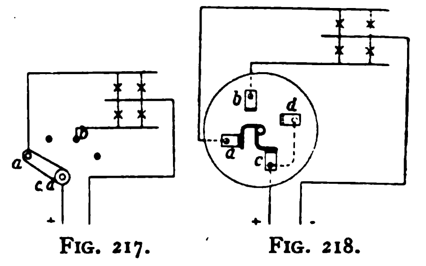


FIG. 217. FIG. 218.

le groupe supérieur de lampes est relié à la canalisation; vient une touche de repos où tous les circuits sont coupés; puis une touche *b* reliée au second groupe; enfin, une nouvelle touche isolée.

COMMANDE ALTERNATIVE ET SIMULTANÉE. — L'interrupteur représenté (fig. 219 et 220) allume le groupe inférieur des lampes dans la position indiquée; il met en activité les deux groupes quand ses pièces mobiles touchent à la fois les plots *a* et *b*; un plot plus loin, le groupe supérieur seul reste en activité, tandis que tout est éteint à la dernière touche.

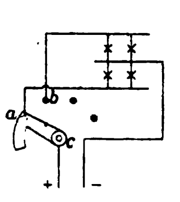


FIG. 219.

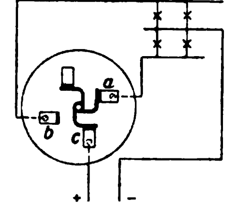
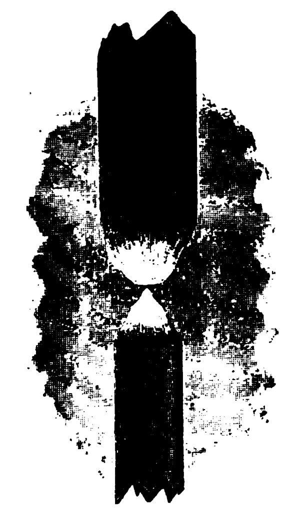


FIG. 220.

§ 2. — L'ARC VOLTAÏQUE.

Production de l'arc à courant continu. — Lorsque deux crayons de charbon entre lesquels on peut maintenir une tension d'environ trente-cinq volts sont portés au contact, puis séparés à quelques millimètres l'un de l'autre, on constate qu'une étincelle électrique est entretenue entre eux d'une manière constante, par la combustion lente du charbon.


FIG. 221.

Si les crayons sont placés verticalement, le charbon positif se trouvant au-dessus, on verra peu à peu se former au centre de ce dernier un *cratère* porté à l'incandescence, tandis que le charbon négatif inférieur, moins incandescent, se taille en pointe (fig. 221). Entre les deux règne une atmosphère de vapeur de carbone de couleur violacée. La température du cratère est de 3500°, tandis que la pointe du

charbon négatif n'atteint que 2 700°. Dans une enceinte fermée, l'éclat et la température du cratère sont des constantes, ce qui laisse supposer que la haute température fixe obtenue serait celle de vaporisation du carbone.

La lumière de l'arc, insoutenable à l'œil nu, se rapproche comme composition de la lumière solaire. Elle contient également les rayons ultra-violets favorisant les réactions chimiques; son application prolongée provoque des insolations de la peau.

Les 85 °/₀ de la totalité de la lumière rayonnée sont émis par le cratère; 10 °/₀ seulement émanent du crayon négatif et les 5 °/₀ restants de l'arc lui-même.

La forme du cratère est très favorable au point de vue de l'utilisation du flux lumineux qui se trouve ainsi renvoyé vers le bas. Il y a avantage de le dégager le plus possible; aussi le crayon positif est-il toujours de plus fort diamètre que le négatif. Cette augmentation de masse procure le second avantage de compenser son usure plus rapide.

Crayons a mèche. — On assure un bon centrage du cratère, en donnant au crayon positif une âme ou *mèche* de structure plus tendre, composée de 80 à 85 °/₀ de carbone, 10 °/₀ de silicates ou borates et 5 °/₀ d'eau. Les substances plus volatiles contenues dans la mèche, diminuent en outre la résistance et augmentent la fixité de l'arc.

Chute de potentiel dans l'arc. — D'après Mme Ayrton, la force électromotrice à appliquer aux crayons pour entretenir un arc de i ampères et de longueur l est donnée par la relation suivante, dans laquelle a, b, c et d sont des constantes

$$e = a + bl + \frac{c + dl}{i}.$$

Le terme a paraît correspondre à une force contre-électromotrice pendant longtemps admise, puis niée. Tout récemment, dans une longue suite d'expériences du plus haut intérêt, M. Duddel est arrivé à cette conclusion, qu'il existerait bien des forces électromotrices thermo-électriques dans l'arc, se composant de deux parties, chacune d'elles prenant naissance contre ou tout près des électrodes : celle de l'élec-

trode positive, d'environ 17 volts, s'oppose au passage du courant; celle de l'électrode négative, d'environ 6 volts, favorise au contraire ce passage. Il resterait donc environ 11 volts comme force contre-électromotrice résultante.

Stabilité et rendement. — Pour être stable, l'arc doit avoir certaine longueur dépendant de l'intensité du courant, du diamètre des charbons et de la différence de potentiel appliquée. L'arc trop long devient sifflant et fugace. Chose qui paraît paradoxale au premier abord, et démontrée par Mme Ayrton au Congrès de Paris de 1900 (*), *les meilleurs résultats économiques sont obtenus avec des arcs le plus courts possible.* A courant constant on trouve, en écartant progressivement les charbons, un premier maximum d'intensité lumineuse pour la longueur de 1 millimètre environ, suivi d'un minimum, puis, pour un écart plus grand, entre 4 et 5 millimètres, un second maximum. Ces variations proviennent principalement de la forme que prend l'extrémité du charbon négatif obstruant plus ou moins le cratère et de l'absorption de la lumière qu'émet ce dernier, par les particules de carbone contenues dans l'arc. On s'explique d'ailleurs le meilleur rendement économique de l'arc court, par ce fait que la puissance à dépenser dans l'arc même pour l'allonger est très grande, alors que la quantité de lumière qu'il fournit est minime.

Le rendement de l'arc s'améliore avec la puissance suivant une fonction linéaire de la forme $I = aP - b$, I étant l'intensité lumineuse sphérique, P la puissance dépensée, a et b des constantes.

La force électromotrice minimum qu'exige un arc continu est de 33 volts. On peut, sans rompre l'arc, interrompre son application pendant un temps appréciable, $^1/_{10}$ de seconde environ. La durée de l'interruption peut être d'autant plus longue, que les charbons employés ont une âme plus riche en matières salines conductrices.

(*) Mme Ayrton, *L'intensité lumineuse de l'arc à courant continu.* (Rapports et procès-verbaux du Congrès d'électricité, p. 250.)

Arc alternatif. — Ici les deux charbons se taillent semblablement en pointe. L'usure serait la même, n'était l'influence du courant ascensionnel d'air chaud. Les crayons sont égaux et tous deux à âme minéralisée, ce qui permet d'abaisser le voltage nécessaire à 30 volts et même moins.

L'identité des deux pointes change totalement la répartition du flux lumineux, qui est symétrique par rapport au plan horizontal médian. On est donc obligé, pour l'utiliser rationnellement, de le rejeter vers le bas au moyen de réflecteurs, ce qui ne se fait pas sans pertes.

D'autre part, le rendement lumineux de l'arc alternatif, comme l'ont constaté de nombreux expérimentateurs, et notamment MM. Blondel et Jigouzo (*), n'est guère que la moitié de celui à courant continu. En d'autres termes, il faut dépenser une puissance double, à effet lumineux égal. Il varie avec la forme de la courbe du courant, et est d'autant plus satisfaisant que cette forme est plus aplatie.

Enfin, les arcs alternatifs font entendre un bourdonnement désagréable, que l'on atténue en les enfermant dans des globes clos. La fréquence du courant qui les alimente doit être d'au moins 50, pour assurer la fixité de l'éclairement.

Arc enfermé. — L'arc qui se développe dans une atmosphère confinée, composée de gaz brûlés, présente des caractéristiques très particulières : le charbon positif supérieur est à peine creusé, parce que l'arc tourne constamment autour de son extrémité; le charbon négatif inférieur est presque plan ; leur distance normale atteint environ 8 millimètres, la force électromotrice appliquée s'élevant à 80 volts.

L'atmosphère confinée est obtenue au moyen d'un double globe dont l'intérieur, fermé par un obturateur de forme spéciale, laisse l'air se dilater sous l'action de la chaleur développée, tout en ne permettant qu'un échange très faible entre les atmosphères intérieure et extérieure. Le grand globe extérieur, souvent fermé par une soupape, constitue lui-même une seconde enceinte préservatrice qui se remplit des gaz brûlés dans le petit globe.

(*) *Ouvrage cité*, p. 232.

La combustion des charbons placés dans ces conditions se trouve extrêmement retardée et leur renouvellement ne se fait que toutes les 150 à 200 heures, suivant leur longueur; mais la présence de deux globes augmente l'absorption qu'accentue encore l'encrassement du globe intérieur, par suite d'un dépôt ocreux de silice chargée d'un peu d'oxyde de fer. La teinte de la lumière émise est bleue.

Fabrication et dimensions courantes des crayons. — On pulvérise du coke de cornue que l'on mélange aussi intimement que possible avec du noir de fumée, du goudron et certaines substances chimiques ajoutées, soit pour augmenter la durée, soit la puissance lumineuse, ces deux facteurs s'excluant en général l'un l'autre. La pâte ainsi formée, réduite en poudre et purifiée, est, après de nombreux malaxages, filée sous pression et découpée à longueur. Rassemblés en paquets, les crayons sont placés dans des creusets en terre et entourés de tous côtés de poudre de coke. On lute la partie supérieure des récipients réfractaires avec de l'argile et on les place dans des fours généralement chauffés au gaz et continus. L'application de la chaleur se fait progressivement jusqu'à atteindre 1 400 à 1 700°.

Après refroidissement, les crayons sont soumis à un travail mécanique de tournage et de polissage. On fore l'axe des positifs et y introduit la mèche; enfin, dans le but de réduire la résistance, on cuivre parfois certains charbons par la galvanoplastie.

Les diamètres courants des crayons positifs varient de 10 à 25 millimètres, ceux des négatifs conjugués étant respectivement de 6 à 18 millimètres. L'usure horaire s'élève à 18 ou 20 millimètres pour chacun d'eux et les intensités correspondantes des courants sont 4 et 50 A.

La résistivité moyenne des charbons à lumière est de 8 000 microhms-centimètres.

Classification des lampes à arc. — Les lampes à arc se divisent en deux catégories, d'après la manière dont les charbons sont ramenés a la distance voulue malgré leur usure : les *lampes à régulateur*, dans lesquelles un mécanisme

est chargé de déplacer un crayon ou tous les deux, suivant nécessité; les *bougies*, dans lesquelles l'écartement des crayons reste invariable.

Conditions à remplir par les régulateurs. — 1° Il faut que les charbons, d'abord au contact ou amenés au contact, soient ensuite écartés à la distance convenable; 2° ils doivent être rapprochés au fur et à mesure de leur usure, de manière à compenser celle-ci. Le régulateur sera d'autant meilleur que les rapprochements successifs seront plus petits.

La puissance lumineuse, émise par un foyer donné, a pour exacte contre-partie l'énergie électrique qu'il consomme. En rendant celle-ci constante, l'autre le sera aussi. Comme, ainsi que nous l'avons vu, la différence de potentiel à entretenir aux bornes d'un arc de longueur donnée, est une fonction linéaire de l'intensité, il suffira, pour assurer cette constance, de rendre invariable soit l'intensité, soit la tension, soit le rapport des deux, c'est-à-dire la résistance apparente de l'arc. Dans ce dernier cas, c'est la machine génératrice qui, travaillant sur un ou des circuits de résistance constante, fournira la puissance constante que se partageront les divers régulateurs.

Régulateurs à courant constant. — Un solénoïde S (fig. 222) est monté en série avec l'arc A. Une double poulie R reçoit les cordelettes suspendant, d'une part, le charbon supérieur et sa monture, dont le poids prédomine, et, d'autre part, le noyau du solénoïde. La forme de ce dernier est telle, qu'à intensité constante, l'attraction qu'il subit de la part du solénoïde reste sensiblement la même quelle que soit sa position. Le charbon inférieur reste fixe.

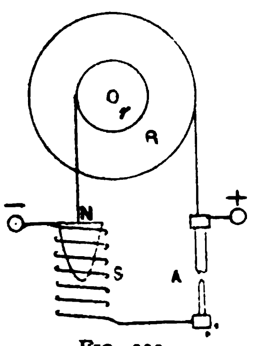


Fig. 222.

A l'état de repos, le charbon supérieur vient en contact avec l'inférieur. Dès qu'on admet le courant dans l'appareil, le solénoïde aspire le noyau N; le charbon supérieur s'écarte vers le haut; l'arc jaillit. Le déplacement s'effectue jusqu'au

point où le moment du poids P du charbon supérieur et de sa monture par rapport à l'axe O de rotation, est équilibré par le moment relativement au même axe, du poids p du noyau auquel s'ajoute la force attractive f du solénoïde. L'équilibre est obtenu quand

$$PR = (p + f)r, \tag{1}$$

r et R étant les rayons d'enroulement des deux poulies. D'autre part,

$$f = kni_1, \tag{2}$$

i_1 étant l'intensité du courant quand l'équilibre est atteint.

Lorsque les charbons s'usent, l'arc s'allonge, l'intensité du courant diminue. L'attraction f se réduisant proportionnellement à i_1, l'équation (1) n'est plus satisfaite et le noyau N remonte jusqu'au point où, par l'augmentation du courant, f reprend la valeur (2).

L'équation de ces appareils est donc

$$f = kni_1 = c^{te} \quad \text{ou} \quad i_1 = c^{te}.$$

Nous aurions obtenu directement cette équation en éliminant f entre les équations (1) et (2).

Grâce à la multiplication de la course due au rapport des rayons r et R, à un faible déplacement du noyau correspond une grande course du charbon.

Système a déclic. — Dans certains appareils, le mouvement du porte-charbon supérieur est enrayé par un mécanisme formant frein. En appelant f_1 l'effort qui doit être exercé pour bloquer le charbon supérieur, celui-ci ne sera libéré que lorsque, sous l'action attractive du noyau, l'effort deviendra moindre que f_1 pour y être ramené immédiatement par le déplacement de l'électrode mobile. On a donc $f_1 = kni_1 = c^{te}$ ou $i_1 = c^{te}$ comme précédemment.

L'action du dispositif n'est pas continue ; les déplacements se font par à-coups.

Régulateurs à tension constante. — Dans le régulateur à tension constante, le rappel de l'usure est effectué par un

solénoïde monté en dérivation sur les crayons (fig. 223). Le moment du noyau a ici une action prépondérante, de sorte que les charbons sont écartés au repos.

S'il n'y avait que les organes charbons et électro dans le circuit contenant la lampe, elle ne pourrait fonctionner. En effet, le solénoïde directement raccordé aux conducteurs d'alimentation maintenus sous une différence de potentiel constante, se trouverait traversé par un courant constant. Son attraction resterait constante et, après avoir été allumé, l'arc s'allongerait jusqu'à extinction.

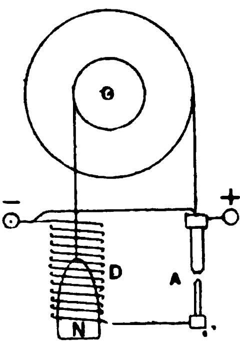


FIG. 223.

Pour faire répercuter sur le solénoïde les variations de l'intensité du courant traversant l'arc et par suite régler la longueur de ce dernier, il suffit de monter en série avec la lampe une résistance r dite ***additionnelle*** ou de ***stabilité***.

Appelons, en effet, d et a les résistances respectives du solénoïde et de l'arc; I le courant total traversant r; i_d le courant dérivé dans le solénoïde et E la différence de potentiel existant entre les conducteurs d'alimentation. On a :

$$I = \frac{E}{r + \dfrac{da}{d+a}} = \frac{E(d+a)}{r(d+a)+da}; \qquad (1)$$

$$i_d = I\frac{a}{d+a} = \frac{E(d+a)}{r(d+a)+da}\cdot\frac{a}{d+a}$$

$$= \frac{Ea}{r(d+a)+da} = \frac{E}{\dfrac{rd}{a}+r+d}. \qquad (2)$$

Il résulte de cette dernière équation, que lorsque la résistance a de l'arc augmente par son allongement, l'intensité du courant traversant le solénoïde n'est plus invariable comme en l'absence de résistance additionnelle, ***elle augmente***.

Allumage et fonctionnement. — Dans ces conditions, quand on envoie un courant dans la lampe, le noyau est attiré, les charbons se rapprochent et arrivent au contact. Lorsque le contact se produit, le solénoïde mis en court-circuit n'est plus traversé que par un courant extrêmement faible; son attraction décroît brusquement, les charbons s'écartent, l'arc s'établit et prend une longueur réglée par l'équilibre entre le moment du poids moteur pr et celui de l'attraction magnétique fr d'où $f = p$. La combustion allonge l'arc, sa résistance augmente, l'intensité du courant dérivé dans le solénoïde augmente (2), d'où plus grande attraction exercée sur le noyau et rapprochement des charbons jusqu'à ce que le moment d'équilibre pour lequel la lampe est réglée soit atteint de nouveau.

En appelant n' le nombre de spires du solénoïde, e la différence de potentiel aux bornes de la lampe, k' une constante, on a :

$$f = k'n'i_d = p \quad \text{et, comme} \quad i_d = \frac{e}{d}, \quad \frac{k'n'e}{d} = p.$$

Les quantités p, k', n', et d étant constantes, il en résulte que l'équation précédente peut s'écrire $e = c^{te}$.

C'est la formule de ces régulateurs, d'où le nom de ***régulateurs à tension constante*** qui leur a été donné, parce qu'ils maintiennent la tension constante aux bornes de la lampe.

La résistance additionnelle a aussi pour but d'empêcher la production d'un court circuit au moment où se produit le contact des charbons. Elle est constituée par un fil métallique enroulé sur un noyau cylindrique en porcelaine, et mesure de 1 à 2 ohms. Un curseur glissant sur les spires permet d'en insérer plus ou moins dans le circuit et ainsi de faire varier la valeur de la résistance s'il y a lieu. L'électro dérivé mesure de 200 à 500 ohms.

Régulateurs différentiels. — Les régulateurs différentiels combinent les deux dispositifs précédents. Un noyau allongé

N (fig. 224), pénétrant dans les deux solénoïdes D et S, équilibre exactement le poids du charbon supérieur. Le solénoïde D se trouve en dérivation sur l'arc, l'autre étant en série.

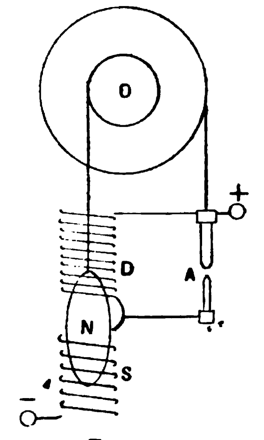


Fig. 224.

Au moment de la fermeture du circuit, de deux choses l'une : ou les charbons sont en contact, ou ils sont écartés. S'ils sont en contact, le courant principal est très intense, l'action du solénoïde inférieur prédomine, les crayons s'écartent, l'arc jaillit ; s'ils ne sont pas en contact, c'est le solénoïde en dérivation qui acquiert brusquement une forte influence, ce qui amène les charbons en contact, puis les choses se passent comme ci-dessus. Quand les crayons s'usent, l'action du solénoïde dérivé augmente de manière à les rapprocher.

L'écart normal est réglé par la condition

$$kn(i_a + i_d) = k'n'i_d,$$

n et n' étant respectivement les nombres de spires des solénoïdes en série et dérivé. Mais $i_d = \frac{e}{d}$ en appelant e la différence de potentiel régnant aux bornes de l'arc. En remplaçant i_d par sa valeur dans l'équation précédente, il vient :

$$kni_a = (k'n' - kn)\frac{e}{d} \quad \text{ou} \quad \frac{e}{i_a} = \frac{knd}{k'n' - kn} = c^{te}.$$

Le rapport de la différence de potentiel aux bornes de l'arc à son intensité, en d'autres termes la ***résistance apparente*** de l'arc reste constante, d'où le nom de ***régulateurs différentiels*** ou ***à résistance constante*** donné à cette dernière catégorie d'appareils.

Voltages nécessaires. — Tandis qu'une lampe en dérivation à l'air libre exige une perte supplémentaire de 30 °/₀ de sa tension dans une résistance de stabilité placée en dehors des charbons, la lampe différentielle n'en demande

que 15 °/₀. Par exemple, il faut 39 V pour une lampe de 30 V en simple dérivation et 34,5 seulement en différentiel.

L'arc à courant alternatif se contente encore d'une moindre résistance de stabilité (la moitié de celle de la différentielle) à cause d'une plus grande sensibilité du mécanisme due aux vibrations.

Comparaison des trois systèmes. — COURANT CONSTANT. — Le régulateur à courant constant n'a plus qu'un intérêt rétrospectif, vu l'adoption générale, pour les distributions, de machines à tension constante. Il présente d'ailleurs ce défaut capital, qu'on ne peut en associer en série un certain nombre puisque, du moment que la résistance du circuit reste la même, ce qui peut se produire avec des arcs de toutes longueurs, mais dont la somme reste constante, le courant garde une valeur invariable et aucun réglage n'est possible.

DÉRIVATION. — La lampe en dérivation est simple, robuste, peu coûteuse. Elle fonctionne régulièrement, mais exige un voltage relativement élevé, qui fait que l'on ne peut en mettre plus de deux en tension sur 110 volts.

Avec l'arc en vase clos, une seule reste en dérivation sur 110 volts. Ce dispositif assure l'indépendance des foyers, permet l'emploi de charbons de qualité médiocre, une consommation très réduite de ceux-ci et une notable réduction de la main-d'œuvre, puisqu'une paire de charbons dure de 150 à 200 heures. Mais le rendement lumineux est beaucoup moindre, et les variations de la lumière sont plus grandes.

DIFFÉRENTIEL. — Les régulateurs différentiels sont beaucoup plus sensibles que ceux en dérivation; la fixité de la lumière est plus grande. Grâce à la faible résistance de stabilité qui leur suffit, il est possible de les grouper par 3 en série sur 110 volts, ce qui assure une meilleure répartition de l'éclairage et une utilisation plus économique du courant.

Mécanismes. — Les dispositifs rudimentaires indiqués pour la simplicité dans les figures 222, 223 et 224 sont, en pratique, remplacés d'une manière générale par des mouvements d'horlogerie. Le poids prépondérant du charbon supé-

rieur, tend à faire défiler une série de rouages dont le dernier est immobilisé par un doigt. L'ensemble du mouvement d'horlogerie, tiré par un ressort, est maintenu en équilibre sous l'action attractive d'un ou de deux électro-aimants, dont les variations d'attraction sur une armature en fer reliée rigidement au mouvement, permettent le déplacement de celui-ci et la libération du dernier rouage. Alors le charbon supérieur défile, raccourcit l'arc, l'action des électros fléchit, sous l'action du ressort le dernier rouage vient s'enclencher de nouveau sur le doigt, et ainsi de suite. Les mouvements trop brusques sont évités par des cataractes à air.

Si les deux porte-charbons sont réunis par une cordelette, le point lumineux reste fixe dans l'espace, puisque le charbon inférieur monte d'autant que l'autre descend.

Le mécanisme des lampes à arc en vase clos est des plus rudimentaires. Il ne comporte qu'un solénoïde agissant par coïncement ou freinage sur l'armature du porte-charbon supérieur. Le solénoïde est mis en série avec l'arc et la résistance qui absorbe le reste de la tension disponible.

Enfin, dans le but de doubler la durée de l'éclairage, certaines lampes à arc libre portent deux paires de charbons que le mécanisme met automatiquement en service l'une après l'autre.

Bougies électriques. — Les deux crayons de charbon recouverts d'un dépôt de cuivre pour augmenter leur conductibilité, sont séparés par un isolant composé de plâtre et de baryte appelé *colombin,* et insérés dans les mâchoires d'un *chandelier* amenant le courant. Un enduit charbonneux réunit les deux pointes des crayons, de façon à assurer l'amorçage initial de l'arc. Le colombin se consume et disparaît au fur et à mesure de l'usure des charbons. Celle-ci reste égale, à condition d'alimenter l'arc par du courant alternatif.

Le diamètre des charbons ne dépasse pas 4 millimètres et leur écartement 3. Sous la longueur de 30 centimètres, ils brûlent pendant deux heures.

Le rendement lumineux est faible, la lumière irrégulière d'intensité et de teinte. Ces appareils, qui eurent un moment

de grande vogue au début de l'éclairage électrique, ne sont plus employés qu'exceptionnellement aujourd'hui.

Puissance et consommation des lampes à arc. — La consommation pratique d'une lampe à arc d'une intensité moyenne hémisphérique de 600 bougies est de 450 watts, soit 0,75 watt par bougie. Dans les distributions à 110 volts avec deux lampes à arc de 10 A, soit une dépense de 550 watts, et où l'on fait usage de globes opales ou dépolis, la consommation monte à environ 1 watt par bougie.

Quand l'arc est en vase clos, la consommation atteint 2,7 watts par bougie avec le courant continu et 3,7 watts avec le courant alternatif, tandis qu'elle n'est que de 2 watts avec les bougies électriques.

§ 3. — RÉPARTITION DE LA LUMIÈRE. MODES D'ALIMENTATION DES FOYERS. DONNÉES PRATIQUES SUR L'ÉCLAIRAGE.

Répartition de la lumière. Incandescence. — Le caractère de l'incandescence est de se prêter à une grande subdivision de la lumière permettant d'obtenir les effets lumineux les plus variés.

La vivacité de sa lumière est souvent tempérée par l'emploi de globes en verre dépoli. Quand, au contraire, on veut la concentrer suivant certaines directions seulement, on argente la base de l'ampoule. Enfin, en enveloppant les lampes de globes à doubles cannelures prismatiques spéciales, *globes holophanes*, on substitue à l'éclatant trait lumineux du filament, des sphères lumineuses uniformément éclairées, donnant un éclairage très égal. Dans les applications industrielles, on se contente souvent de pourvoir la lampe d'un réflecteur en porcelaine ou en tôle émaillée.

Arc. — L'éclairage par arc, au contraire, s'applique surtout aux grands espaces, vu la puissance lumineuse élevée qu'il développe. En raison de cette grande intensité, on doit nécessairement le placer très haut, et il y a intérêt à rejeter vers le bas toute la portion du flux lumineux qui n'est pas naturellement dirigée dans cette direction. On le pro-

tège généralement par un globe en verre opale. Deux cas sont à distinguer, suivant que l'on se trouve à l'air libre ou non.

Espaces découverts. — Dans les espaces découverts, les lampes seront pourvues d'un réflecteur en tôle émaillée. Si le point lumineux est fixe, le réflecteur sera avantageusement percé à son centre d'une ouverture permettant le passage du crayon supérieur et pourvu d'une masse en matière réfractaire pour réduire l'usure par combustion du charbon supérieur.

Espaces couverts. — Dans les espaces fermés, on atteint de bons résultats en cachant à l'œil la vue de l'arc et diffusant la lumière sur de grandes surfaces.

M. Jaspar a imaginé de faire renvoyer par le plafond blanchi la lumière d'arcs renversés.

M. Hrabowski entoure l'arc d'une grande crinoline de toile

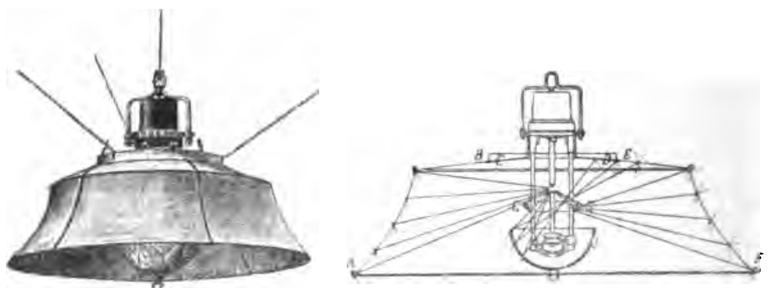


Fig. 225. Fig. 226.

blanche BAFE (fig. 225 et 226) attachée à un réflecteur CD. Toute la lumière émanant de l'arc vient se diffuser directement sur la toile et le réflecteur, ou s'y trouve réfléchie par le demi-globe L et le prisme annulaire en cristal G. On obtient ainsi un éclairage remarquablement homogène et puissant, rappelant la lumière solaire.

Modes d'alimentation des foyers. Incandescence. — Dérivation directe. — Le mode d'alimentation général des lampes à incandescence est la simple dérivation. Les lampes viennent se raccorder directement aux conducteurs d'alimentation maintenus sous tension constante. On a adopté, dès le début, la tension de 110 volts. La nécessité d'économiser le

cuivre dans les canalisations et d'étendre celles-ci le plus loin possible ont conduit à majorer la tension. Actuellement, les distributions d'éclairage se font généralement sous 220-250 volts, le plus souvent suivant le dispositif à 3 fils.

SYSTÈME WEISSMANN. — Mais nous avons vu que plus le voltage appliqué à la lampe augmente, plus son rendement diminue; il diminue de même avec l'intensité lumineuse de la lampe.

Ces considérations ont amené M. Weissmann (*) à conclure qu'il faut *approprier la tension à appliquer aux lampes, à leur intensité lumineuse.* Or, l'emploi du courant alternatif permet aisément d'arriver au résultat. Il suffit, en effet, d'interposer chez le consommateur, entre chaque groupe de lampes et l'interrupteur qui le commande, un tout petit transformateur à circuit magnétique fermé, qui abaisse la tension du courant distribué au degré voulu pour ce groupe de lampes. L'interrupteur est d'ailleurs placé sur le primaire du transformateur de telle sorte que celui-ci ne fonctionne jamais à vide. Avec des lampes de 16 bougies à 22 volts, M. Weissmann arrive aux consommations très avantageuses de 1,67 à 1,93 watt par bougie.

Il conviendra toutefois d'attendre, pour le juger, que le système, d'ailleurs très séduisant, ait fait ses preuves.

Arc. — L'arc s'alimente soit sous intensité, soit sous tension constantes.

INTENSITÉ CONSTANTE. — L'alimentation à intensité constante se prête particulièrement aux éclairages publics. Les lampes soit en dérivation (arc libre ou enfermé), soit différentielles, sont groupées jusqu'à 100 en série et alimentées par des machines à intensité constante. Dans le cas de lampes multiples, les résistances additionnelles disparaissent, la résistance des autres lampes jouant parfaitement ce rôle. Le

---

(*) WEISSMANN, *Rendement lumineux des lampes électriques à incandescence.* (RAPPORTS ET PROCÈS-VERBAUX DU CONGRÈS INTERNATIONAL DE 1900, p. 269.)

montage en série n'est pour ainsi dire pas appliqué sur le continent, où l'on préfère recourir à l'alimentation en dérivation.

TENSION CONSTANTE. — On pourra monter sur 110 volts, ainsi que nous l'avons vu : 1 lampe à arc enfermé ; 2 en dérivation et 3 différentielles. Avec le courant alternatif, on peut toujours grouper 3 lampes en série avec leur résistance de stabilité qui est ici une bobine inductive.

Données pratiques (*). — INCANDESCENCE. — On admet pour un éclairage normal moyen 1 à 2 bougies décimales par mètre carré. Pour un éclairage brillant, il faut atteindre 4 à 5 bougies portées à 20 bougies par mètre carré, sur la scène d'une salle de spectacle. Un éclairage moyen, dans une salle de spectacle, s'obtiendra en attribuant 0,5 bougie par mètre cube du volume total (salle et scène).

ARC. — Le tableau suivant fournit des indications générales *approximatives* se rapportant à des arcs à courant continu à l'air libre, recouverts de globes légèrement opalins.

ÉLÉMENTS DE FONCTIONNEMENT.	INTENSITÉ DU COURANT en ampères.			
	6	10	13	24
Intensité lumineuse nominale, en bougies décimales	400	1 000	1 500	4 000
Hauteurs des foyers au-dessus du sol, en mètres	4 à 7	7 à 10	10 à 15	15 à 20
Surfaces éclairées, en mètres carrés :				
Filatures, tissages, ateliers de précision.	25	50	75	100
Ateliers de mécanique et d'ajustage	50	100	150	300
— montage, fonderies, chaudronneries, etc.	75	150	200	500
Cours, gares, quais, grands halls	250	500	750	2 000
Bureaux de dessin. (Arc renversé)	30	75	100	

(*) HOSPITALIER, *Formulaire*, 1900-1901 ; p. 369.

CHAPITRE XVIII

TRACTION

§ 1. — GÉNÉRALITÉS.

Classification des systèmes de traction. — La traction électrique constitue un cas particulier de distribution de l'énergie, dans lequel les récepteurs sont mobiles. On y rencontre donc une usine centrale génératrice et des véhicules électriques. C'est par le mode de distribution adopté pour transmettre l'énergie aux véhicules que se différencient les systèmes; ils se groupent en deux grandes classes, suivant que l'alimentation est directe ou indirecte. Dans le premier cas, nous trouvons des artères et un réseau de distribution; dans le second, les voitures transportent leur source d'électricité, qui est une batterie d'accumulateurs. Les systèmes mixtes combinent ces deux modes d'alimentation.

Nous examinerons en premier lieu les points communs à tous les systèmes avant d'aborder leur étude individuelle, en nous attachant plus spécialement au cas des tramways.

Renforcement de la voie. — Les véhicules électriques étant beaucoup plus pesants que ceux à traction chevaline, exigent un renforcement de la voie. La figure 227 montre la coupe de rails très employés, les rails Phœnix, ainsi que leur mode d'éclissage. Ces rails, comme d'ailleurs ceux ordinairement utilisés en Europe, sont à gorge et ont été renforcés jusqu'au poids de 40 à 50 kg par mètre courant. On les pose sur des traverses ou des longuerines en bois ou en métal. La voie est renforcée



FIG. 227.

par une couche de béton de 15 à 20 centimètres d'épaisseur dans les rues à grande circulation.

Effort de traction. — L'effort tracteur doit vaincre les résistances s'opposant au mouvement et qui sont : la résistance au roulement, celles dues aux rampes et à l'air, enfin la résistance que provoque l'inertie des masses à déplacer. Cette dernière prend une importance prépondérante lors des démarrages rapides.

Roulement. — PALIER. — La résistance au roulement dépend du système de voie, de son mode d'établissement et de l'état des rails. Elle est proportionnelle au poids du véhicule. Voici quelques coefficients :

NATURE DE LA VOIE.	EFFORT DE TRACTION en kilogrammes par tonne.
Pavage en granit	7,9
Id. en bois	18,8
Macadam ancien	20,4
Id. nouveau	45,8
Voie de chemin de fer (rails saillants)	4
Voie de tramway propre et mouillée	6,8
Id. ordinaire	11,5
Id. très poussiéreuse	27,4

En appelant k le coefficient de résistance au roulement par kg, et p le poids du véhicule en kg, l'effort sur palier est égal à kp.

RAMPES ET PENTES. — Dans les rampes ou les pentes, la force qui applique le véhicule perpendiculairement au sol est $p \cos \alpha$ (fig. 228), α étant l'angle de pente; la force à développer pour provoquer le roulement est donc $f_1 = kp \cos \alpha$, tandis que la composante $f_2 = p \sin \alpha$ du poids paral-

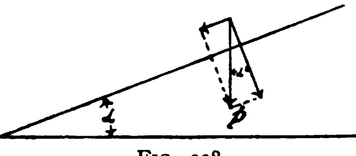


FIG. 228.

lèle au sol s'oppose directement à la propulsion ou aide cette dernière. La force totale nécessaire pour déplacer le poids p devient dès lors

$$f_1 + f_2 = kp \cos \alpha \pm p \sin \alpha = p \cos \alpha (k \pm \text{tg}\, \alpha) = p \cos \alpha (k \pm i),$$

i représentant la pente par mètre. En pratique, α est toujours très faible, de sorte que l'on peut remplacer $\cos \alpha$ par l'unité et la formule devient

$$f_1 + f_2 = p(k \pm i). \qquad (1)$$

Elle montre que *l'effet de la déclivité est de majorer ou diminuer l'effort de traction d'une fraction du poids donnée par l'expression de la pente elle-même.*

Exemple numérique. — Supposons une voiture de tramway pesant 10 T sur une voie ordinaire en rampe de 10 millimètres.

$$p = 10\,000, \quad k = 0{,}011 \quad \text{et} \quad i = 0{,}010.$$

$$f_1 + f_2 = 110 + 100 = 210 \text{ kg}.$$

Courbes. — Dans les courbes, la résistance au roulement se trouve majorée par le frottement du bourrelet de la roue dans le rail et le patinage d'une des roues, celles-ci faisant en général corps avec l'essieu. M. Reckenzaun a conclu de ses expériences que l'effort de traction est approximativement doublé dans les courbes de 15 mètres et triplé dans celles de 10. Pour la voie normale, on peut représenter sa valeur par la formule $\frac{0{,}36}{R}$ par kg, R étant le rayon exprimé en mètres. On réduit la résistance dans les courbes, en employant des essieux convergents ou des boggies.

Résistance de l'air. — La résistance de l'air est en kg $f_3 = 0{,}085\, S\, v^2$, S étant, en mètres carrés, la surface offerte au vent, soit à peu près 7 mètres carrés pour des voitures de tramway et v la vitesse exprimée en mètres par seconde.

Pour des vitesses de 15 kilomètres à l'heure ou 4,17 m par seconde, $f_3 = 0{,}085 \cdot 7 \cdot 17{,}35 = 10{,}3$ kg, valeur négligeable vis-à-vis des précédentes. Il n'en est plus de même aux grandes vitesses, où la résistance de l'air prend une influence prépondérante.

Démarrage. — Le véhicule partant d'une vitesse O doit atteindre la vitesse v mètres par seconde en t secondes. Pendant ce temps, il parcourt l mètres. Appelons f_4 l'effort moyen nécessaire pour obtenir ce résultat. Le travail effectué

$$f_4 l = f_4 \frac{v}{2} t.$$

Si nous faisons abstraction des autres résistances, ce travail doit se retrouver entièrement sous forme de force vive

$$\frac{mv^2}{2}, \quad \text{d'où} \quad f_4 \frac{vt}{2} = \frac{mv^2}{2} \quad \text{et} \quad f_4 = \frac{mv}{t}.$$

Or

$$p = mg, \quad \text{donc} \quad f_4 = \frac{pv}{gt} = 0{,}102 \frac{pv^2}{2l}.$$

Exemple. — Reprenons les chiffres précédents $p = 10\,000$, $v = 4{,}17$, et supposons que la mise en vitesse se fasse sur une longueur de 50 mètres. L'effort moyen nécessaire sera

$$f_4 = 174 \text{ kg}.$$

Si la mise en vitesse se fait sur 30 mètres, l'effort monte à 290 kg.

Puissance totale nécessaire — Démarrage. — Pendant qu'il a parcouru les l mètres du démarrage, le véhicule a dû vaincre également toutes les autres résistances. Supposons un démarrage en rampe et alignement droit.

L'effort total $F = f_1 + f_2 + f_3 + f_4$.

La puissance *moyenne* nécessaire exprimée en chevaux sera

$$P = \frac{Fv}{2 \cdot 75} = \frac{p(k+i)v}{2 \cdot 75} + \frac{0{,}085\, S v^3}{8 \cdot 75} + \frac{0{,}102\, pv^3}{4l \cdot 75}$$

$$= 0{,}0067\, p(k+i)v + 0{,}000\,14\, S v^3 + 0{,}000\,34 \frac{pv^3}{l}$$

et en watts

$$P = 4{,}93\, p(k+i)v + 0{,}103\, S v^3 + 0{,}25 \frac{pv^3}{l}.$$

En régime. — A vitesse constante v, l'effort de traction sera

$$F' = p(k+i) + 0{,}085\,S\,v^2$$

et la puissance correspondante :

$$P'\ \text{chx} = \frac{p(k+i)\,v}{75} + \frac{0{,}085\,S\,v^3}{75},$$

soit, en watts, $9{,}81\,p(k+i)v + 0{,}833\,S\,v^3$.

Exemple. — Reprenons encore les données précédentes $p = 10000$; $k = 0{,}011$; $i = 0{,}010$; $v = 4{,}17$; $S = 7$ et $l = 50$ puis 30; nous trouverons $P = 10{,}87$ et $14{,}16$; $P' = 16{,}9$ chevaux.

Adhérence. — L'entraînement du véhicule se fait grâce à l'adhérence existant entre les roues motrices et les rails. L'adhérence est proportionnelle au poids p' que supporte l'essieu moteur : $a = k'p'$.

Le coefficient k' est très influencé pour l'état de la voie. Alors que par temps sec $k' = 0{,}25$ à $0{,}35$, sa valeur s'abaisse à 0,15 quand les rails sont mouillés, à 0,10 par temps de brouillard et à moins encore lorsque les rails sont couverts de la boue gluante et visqueuse fréquente dans les villes. On la fait remonter à une valeur normale par des projections de sable sur les rails, au moyen des boîtes spéciales dont on munit les voitures.

Pour que l'entraînement puisse avoir lieu, il faut que l'adhérence soit au moins égale à l'effort de traction. On l'augmente en rendant tous les essieux moteurs; de cette façon, le poids total du véhicule et de ses voyageurs est utilisé.

Puissances pratiques requises. — Les chiffres donnés précédemment sont des chiffres moyens, se rapportant notamment à toute la durée du démarrage. Au moment où s'effectue celui-ci, les efforts sont souvent triplés et même quadruplés. De là vient que la puissance des moteurs de tramway est très supérieure à celle ressortant des calculs précédents. Il faut d'ailleurs assurer le remorquage de voitures non-automobiles; aussi n'est-il pas rare de voir munir les voitures de deux moteurs de 15 à 35 chevaux chacun.

Emploi de locomotives. — On peut se demander si l'emploi de locomotives ne se justifierait pas comme dans la traction à vapeur. Il est aisé de démontrer que cette solution serait mauvaise.

Prenons le cas d'une ligne ayant une rampe de 6 centimètres par mètre, donc $i = 0{,}06$. Admettons un coefficient de traction $k = 0{,}015$ et un coefficient d'adhérence $a = 0{,}12$. L'effort total à exercer pour entraîner la locomotive et la remorque des poids respectifs p et p' sera

$$F = (p + p')(k + i) = 0{,}075(p + p').$$

Pour que cet effort puisse être intégralement utilisé, il faut que l'adhérence lui soit au moins égale. Or celle-ci est égale à $0{,}12\,p$. On aura donc à la limite

$$0{,}12\,p = 0{,}075(p + p'), \quad \text{d'où} \quad p = 1{,}66\,p'.$$

Dans le cas envisagé, le poids du remorqueur serait donc très supérieur à celui du véhicule, ce qui ferait doubler, et au delà, les frais de traction. La vraie solution est de recourir à une automotrice dont tous les essieux sont moteurs, de manière à disposer d'un supplément de force permettant d'entraîner une ou deux voitures remorquées.

Rampe maximum. — C'est aussi par la formule précédente que l'on calcule la rampe maximum $0{,}0x$ qu'une voiture de poids p et d'adhérence a peut gravir. On a en effet :

$$p(k + 0{,}0x) = ap \quad \text{ou} \quad 0{,}0x = a - k \quad \text{et} \quad x = \frac{a - k}{0{,}01}.$$

Si $a = 0{,}12$ et $k = 0{,}011$, on trouve $x = 10{,}9\,\%$.

Types de voitures. — Les voitures de tramway appartiennent, en général, à deux types différents : 1° les grandes voitures contenant cinquante voyageurs environ et pesant une dizaine de tonnes lorsqu'elles sont remplies ; 2° les petites voitures contenant de 30 à 32 places et pesant 6 tonnes.

Les voitures sont constituées d'une caisse reposant par l'intermédiaire de ressorts sur un truck.

Trucks. — TRUCK RIGIDE. — Le truck rigide (fig. 229), composé d'une charpente métallique reposant par l'intermédiaire de boîtes à graisse et de ressorts sur les essieux de deux paires de roues, est le plus employé. Afin de réduire la



FIG. 229.

résistance dans les courbes, les essieux sont aussi rapprochés que possible. Leur empattement (distance qui les sépare) se fixe généralement aux environs de 1,80 m. La voiture est très longue, 6 à 8 mètres, et l'une des plates-formes se trouvant souvent surchargée de voyageurs, il en résulte une mauvaise répartition des efforts, et une fatigue du matériel et de la voie que l'on évite par l'emploi de boggies.

BOGGIE. — On a alors, à chaque extrémité de la voiture, deux paires de roues très rapprochées réunies rigidement et pivotées autour d'un axe central. L'inconvénient est qu'avec deux moteurs, on ne dispose plus que de la moitié du poids pour l'adhérence, puisqu'il y a quatre essieux. M. Brill a remédié en grande partie à ce défaut, en modifiant le point de suspension sur le boggie, de manière à reporter la presque totalité de la charge sur les essieux moteurs seuls.

ESSIEUX RADIAUX. — Dans le système Robinson, à essieux radiaux, il n'existe que troix essieux. Les deux extrêmes sont seuls moteurs, et portent les 0,95 de la charge. L'essieu médian se relie aux extrêmes par des bielles. Chaque essicu pivote autour d'un axe vertical situé sur l'axe de la voiture,

de sorte qu'il se dirige suivant le rayon des courbes, en réduisant la résistance à un minimum.

Nature du courant. — C'est au courant continu que l'on a généralement recours. Cependant, dans certaines lignes et plus particulièrement des lignes accidentées ou de grande section, l'utilisation aisée de plus hautes tensions a fait préférer les courants triphasés.

Types de moteurs. — Le moteur le plus utilisé est le moteur série que recommandent tout spécialement son couple de démarrage extrêmement puissant et la constance de sa réaction d'induit réduisant les étincelles. On ne rencontre le moteur en dérivation que dans les voitures à accumulateurs, lorsque l'on veut récupérer l'énergie dans les pentes. Cette récupération est impossible avec le moteur série, à cause du renversement de courant qui serait nécessaire et supprimerait tout magnétisme dans les inducteurs. Mais on peut alors l'utiliser comme un frein puissant et excellent (parce qu'il ne réduit l'usure d'aucun organe) en le faisant travailler sur des résistances.

Les balais en charbon permettent la rotation dans les deux sens. On s'affranchit de déplacements incessants en les calant à demeure sur la ligne neutre.

C'est l'enroulement en tambour qui prédomine, à cause de son meilleur rendement et de sa compacité. On porte sa résistance mécanique à un maximum par l'emploi d'induits dentés. La visite générale du moteur est facilitée par son montage en deux pièces pivotant sur charnières (fig. 230).

L'adoption d'inducteurs tétrapolaires permet de réduire la vitesse à un taux n'imposant qu'une seule réduction. Les bobines des inducteurs sont enveloppées de toile. Enfin, la forme de leur circuit magnétique en fait une cuirasse hermétiquement fermée protégeant tous les organes (fig. 231), d'où le nom de moteurs *cuirassés* ou *waterproof* qui leur est donné. Le déplacement d'un petit couvercle A permet d'ailleurs très aisément la visite du collecteur.

La transmission se fait soit, mais rarement, par roue héli-

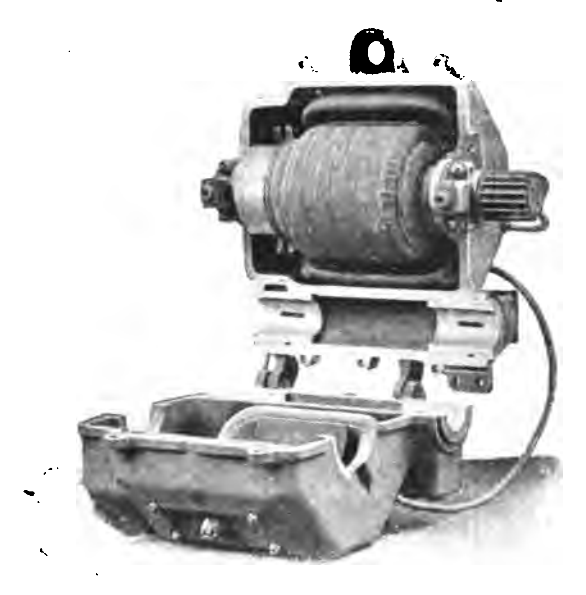


FIG. 230.

çoïdale attaquée par une vis tangente calée sur l'axe du moteur; soit par engrenages cylindriques. Ces organes doivent baigner dans l'huile.



FIG. 231.

Le moteur repose d'un côté sur l'essieu moteur au moyen de coussinets et de boîtes à graisse; il s'attache de l'autre côté par un intermédiaire élastique (forts ressorts d'acier à boudins) à une traverse de truck.

Coupleur. — L'interposition des résistances de démarrage ; les modifications de l'excitation pour faire varier la vitesse ; le groupement des moteurs pour modifier l'énergie absorbée, et le renversement du courant dans les induits pour intervertir le sens de propulsion, se font par l'intermédiaire d'un commutateur spécial appelé *coupleur* ou *combinateur* (fig. 232, 233, 234). Le coupleur comporte deux cylindres isolants garnis d'arcs métalliques frottant sur des balais métalliques raccordés aux divers organes à réunir : résis-

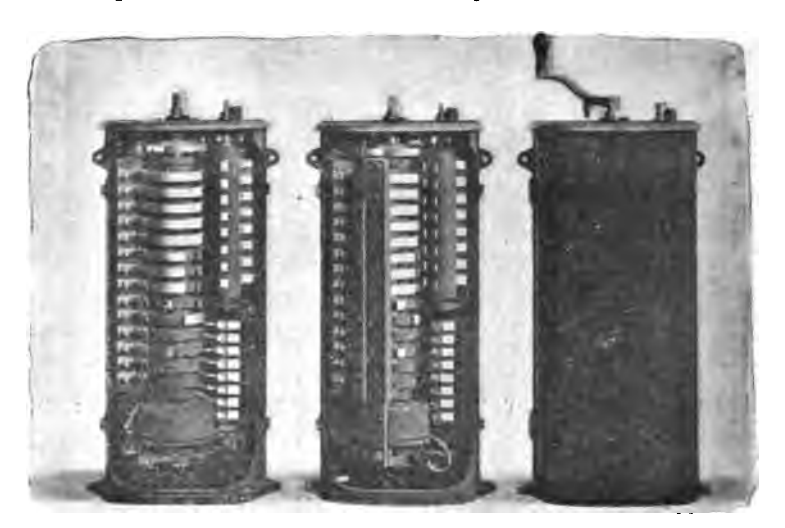


FIG. 232. FIG 233. FIG. 234.

tances, inducteurs, induits. Un *souffleur magnétique* constitué par l'armature découpée d'un électro-aimant, envoie son flux magnétique sur les étincelles d'extra-courant, de manière à provoquer plus rapidement leur rupture. Les cylindres se déplacent au moyen de manivelles amovibles et l'ensemble des organes est protégé par une enveloppe métallique. Le petit cylindre permet d'effectuer uniquement les renversements de marche. Les manivelles sont munies d'un index se déplaçant devant des points de repère, de manière à assurer l'invariabilité des diverses positions des cylindres. Un dispo-

sitif mécanique de bloquage empêche d'ailleurs le déplacement du cylindre de renversement de marche, avant que l'autre soit arrivé au cran de repos. Cette précaution est nécessitée par le fait que la commutation opérée brusquement pendant la marche, aurait pour effet d'orienter la force contre-électromotrice des moteurs dans le même sens que la force électromotrice du circuit d'alimentation, ce qui donnerait lieu à un court-circuit extrêmement dangereux.

Un coupleur est installé sur chacune des plates-formes d'avant et d'arrière, pour permettre la marche dans les deux sens sans retournement de la voiture.

Enfin, l'équipement se complète par des lampes à incandescence commandées par un commutateur spécial et, si les circuits sont aériens, par un parafoudre.

Précautions à prendre au démarrage. — La manœuvre du coupleur doit être faite avec précaution, en s'arrêtant un instant sur chaque cran, de manière à permettre à la force contre-électromotrice d'acquérir une certaine valeur avant de supprimer les résistances de démarrage. Les manœuvres précipitées ne font gagner que peu de temps, tout en consommant beaucoup plus d'énergie qu'il n'est nécessaire.

§ 2. — ALIMENTATION DIRECTE.

Divers systèmes. — Dans les systèmes d'alimentation directe, le courant est amené soit par un conducteur aérien sur lequel s'appuie une roulette, un rouleau ou un archet, soit par des contacts superficiels que touche un contact glissant, soit enfin par des conducteurs nus souterrains posés à l'intérieur d'un caniveau. Dans les deux premiers cas, ce sont les rails qui canalisent le retour du courant, la liaison entre les moteurs et les rails se faisant par les essieux et les roues. Si les courants utilisés sont triphasés, une phase est parfois confinée dans les rails. Cependant, la prise de courant aérienne *triple* ne paraît pas présenter une difficulté insurmontable, comme des essais récents à grande vitesse, effectués en Allemagne,

l'ont démontré. Dans le cas du caniveau, on n'utilise généralement pas les rails au retour du courant, à cause des dangers de court-circuit résultant de leur rapprochement excessif de l'appareil captant le courant sur l'autre pôle.

CONDUCTEURS AÉRIENS.

C'est le système à conducteur aérien ou *à trolley* qui l'emporte de beaucoup, en raison de l'économie d'installation et d'exploitation qu'il réalise. Nous nous en occuperons plus spécialement. Le voltage continu généralement admis est de 550 volts.

Poteaux et consoles. — Le conducteur aérien est suspendu par l'intermédiaire de poteaux généralement métalliques, dont le pied est encastré dans du béton, et distants de

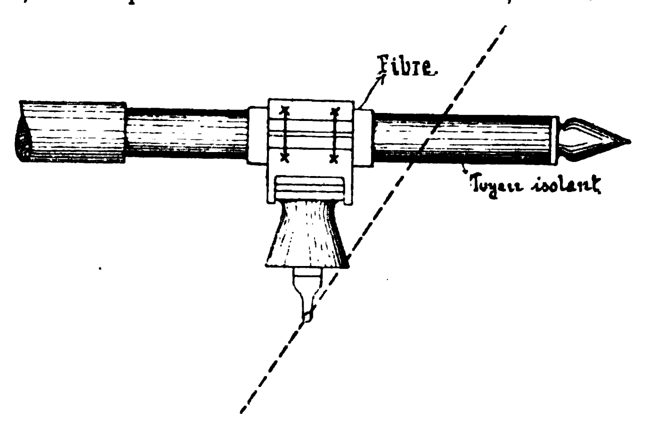


FIG. 235.

35 mètres. Afin d'empêcher l'appareil de prise de courant de mettre la console en communication avec le conducteur d'amenée du courant, il est utile de revêtir la première d'un tube isolant (fig. 235).

Lorsque les circonstances locales s'opposent à l'érection de poteaux, la suspension se fait par l'intermédiaire de fils de fer galvanisé ou de bronze tenace venant s'attacher à des

rosaces solidement fixées dans les murailles, après interposition de tendeurs isolants (fig. 237). Les deux pièces du tendeur (fig. 236) sont noyées dans une substance isolante solide, ambroïne, etc. Leur forme assure une grande résistance mécanique.

Dans les courbes, le conducteur suit les côtés d'un polygone dont les points supportés constituent les sommets.

Suspension de l'isolateur — L'isolateur peut être attaché directement à la console (fig. 235) ou, ce qui vaut mieux parce que l'on obtient ainsi une suspension élastique, par l'intermédiaire de fils d'attache en fer galvanisé ou bronze.

FIG. 236. FIG. 237.

Isolateur. — L'isolateur comporte essentiellement un chapeau en bronze C (fig. 238, 239), pourvu de branches d'attache B, percé verticalement d'un trou cylindrique pourvu d'un épaulement

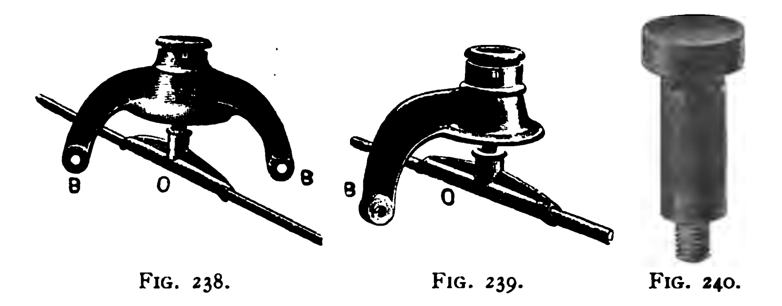


FIG. 238. FIG. 239. FIG. 240.

supportant un boulon isolé (fig. 240) taraudé à sa partie inférieure. Dans les courbes, l'isolateur est soutenu d'un côté seulement (fig. 239). La fixation de l'isolateur peut être simplifiée par le dispositif représenté figure 242, dans lequel le fil est simplement passé dans les crochets terminant les bras. Les fils de soutien se fixent eux-mêmes à des collier assujettis sur la console avec interposition d'un isolant,

ou rattachés à des ancrages. Une double isolation existe donc partout.

Oreille. — L'extrémité filetée du boulon vient se visser dans une pièce allongée en bronze O (fig. 238, 239, 241 et 242),

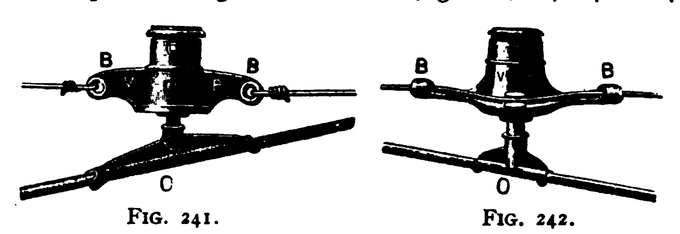


Fig. 241. Fig. 242.

pourvue à sa partie inférieure d'une rainure dans laquelle le fil est soudé.

Conducteur de prise de courant. — Le conducteur amenant le courant à la voiture est ordinairement de section circulaire, en cuivre ou bronze phosphoreux ou silicieux de haute conductibilité. Son diamètre ne dépasse pas 10 millimètres. Afin de réduire le nombre des jonctions, on le fournit sous des longueurs très grandes, dépassant souvent 1 kilomètre. Il est tendu de manière que la flèche ne dépasse pas 40 centimètres.

Artères. — Le conducteur de prise de courant doit être alimenté par des artères présentant une chute de tension uniforme. Afin d'éviter qu'un court-circuit dans la ligne ne compromette le fonctionnement total de celle-ci, on subdivise le fil de trolley en sections de 4 à 500 mètres de long réunies par des fusibles et alimentées individuellement par les artères.

Trolley. — Axial. — Sur le dessous du fil s'applique une roulette en laiton (fig. 243), consolidée latéralement par des nervures radiales, qui ont en outre l'avantage de maintenir les joues de la gorge en place, au moment où le fond de celle-ci est usé à jour. Une buselure conductrice en graphite garnit le moyeu de la roulette, pour adoucir les frottements. La roulette tourne sur un axe supporté par une fourche, et

la communication électrique est améliorée par deux lames de ressort rivées aux bras de la fourche (fig. 243).

Ainsi disposé, le trolley, supporté par une perche métallique fixée sur le toit de la voiture, ne peut, sous peine de déraillement, que se déplacer très faiblement par rapport à l'axe du fil. Celui-ci doit donc se trouver dans l'axe de la voie (d'où le nom de trolley axial). Cette nécessité entraîne l'emploi de très longues consoles d'un aspect peu satisfaisant.

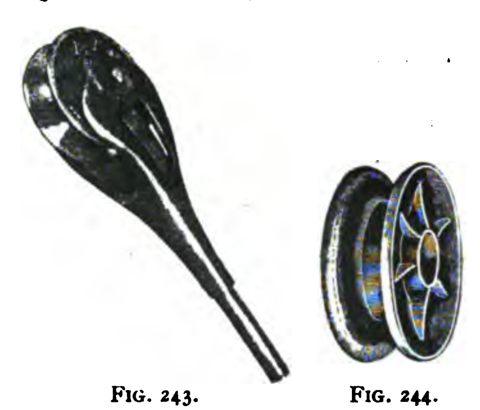


FIG. 243. FIG. 244.

DICKINSON. — Pour y remédier et aussi afin de permettre de

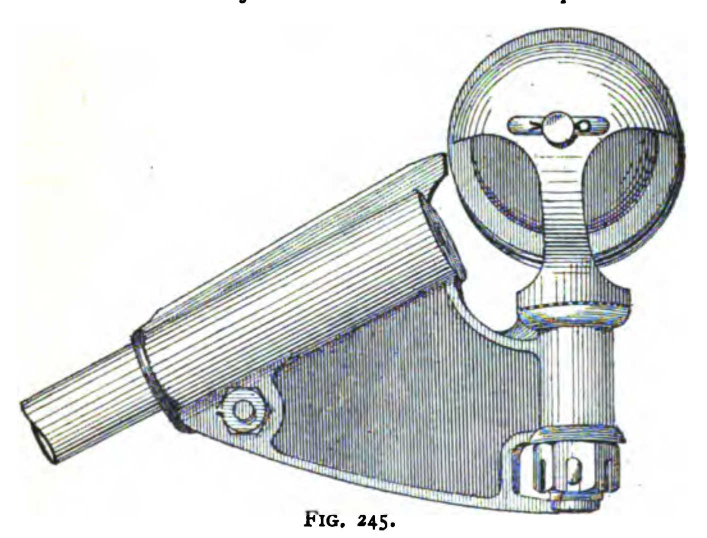
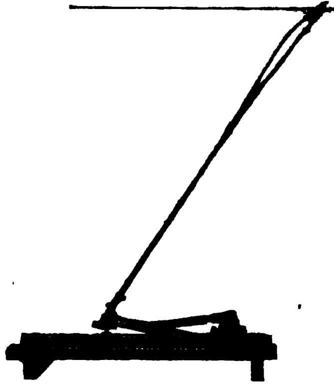


FIG. 245.

donner au contour polygonal qu'affecte le fil dans les courbes, des angles moins obtus, M. Dickinson a imaginé de rendre le plan vertical de la roulette mobile avec sa fourche autour

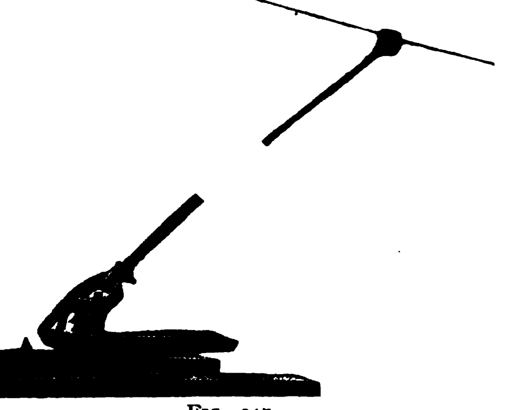
d'un axe vertical (fig. 245). La ligne aérienne peut alors être entièrement reportée le long de la voie; mais ce système facilite les déraillements de la roulette.

Le métal constituant le galet doit être plus doux que celui du fil de service. La meilleure matière pour le galet est le cuivre jaune. On le fixe avantageusement dans des coussinets en bronze phosphoreux.


FIG. 246.

Archet. — L'irrégularité de la ligne aérienne peut encore être accentuée, si l'on capte le courant au moyen d'un *archet*. La roulette fait place à une traverse horizontale (fig. 246) supportée par deux tiges élastiques attachées à l'extrémité du mât. Ce système est beaucoup moins employé que le précédent.

Mât. — Le mât supportant la fourchette, d'une longueur d'environ $3^m,50$, est un tube conique en acier, articulé à la partie inférieure autour d'un axe horizontal monté sur un châssis, qui peut lui-même pivoter autour d'un axe vertical (fig. 246 et 247). Un système de ressorts à boudins sollicite le mât à se relever et à appliquer le galet de roulement sur le fil avec une force comprise entre 4 et 7 kilogrammes.


FIG. 247.

Éclissage électrique des rails. — Pour terminer ce qui a trait à la canalisation, voyons comment les voies doivent être modifiées quand on les utilise au retour du courant.

Afin d'éviter la production de dangereux phénomènes électrolytiques sur les conduites métalliques voisines enfouies dans le sol, il est nécessaire de donner aux rails la conductance

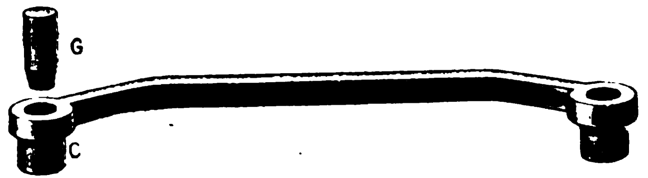


FIG. 248.

la plus élevée possible. L'éclissage ordinaire doit être complété par un éclissage électrique obtenu, par exemple, en serrant énergiquement des fils de cuivre dans les rails. Quand les parties cylindriques C (fig. 248) ont été introduites dans le trou foré dans l'âme du rail, on y chasse de force des goupilles G.

Dans un autre système l'éclisse, de 12 centimètres de longueur seulement, se compose de huit cordes de cuivre de 3 millimètres de diamètre chacune, brasées à leur extrémité sur des plaques de cuivre perforées. La pose se fait de la manière suivante : On avive soigneusement l'âme du rail à chacune des extrémités à rejoindre; les surfaces ainsi décapées sont ensuite étamées, et sur ces dernières on soude les extrémités de l'éclisse électrique. L'éclisse mécanique vient se placer par-dessus, protégeant complètement le joint électrique.

JOINT FALK (*). — Le meilleur dispositif, parce qu'il prolonge la durée des voies, réduit les frais d'entretien, conserve le matériel roulant et donne la conductance la plus élevée,

---

(*) PEDRIALI, *Le joint Falk.* (BULLETIN DE L'ASSOCIATION DES INGÉNIEURS ÉLECTRICIENS SORTIS DE L'INSTITUT MONTEFIORE, t. XI, nov.-déc. 1900, p. 524.)

est fourni par le soudage direct des tronçons de rails voisins, au moyen d'une masse de fonte coulée à une température telle, qu'elle fasse corps avec la matière du rail. La coulée de ce bloc de fonte, dont le poids est d'environ 60 kilogrammes et la longueur 35 centimètres, s'effectue dans une coquille fixée autour du rail par des étriers clavetés, dont les joints sont lutés à l'argile. L'outillage se compose essentiellement d'un cubilot mobile avec soufflerie.

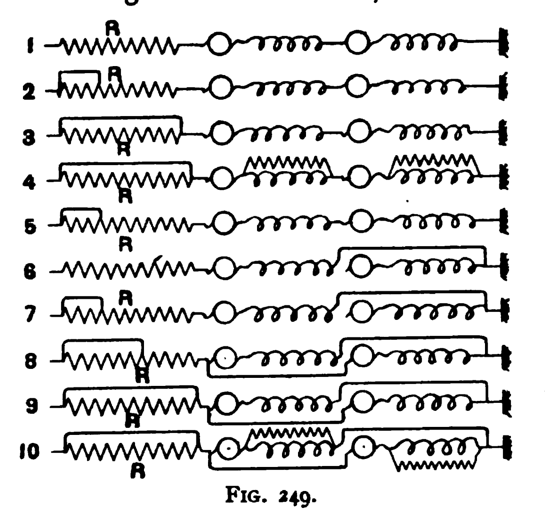


FIG. 249.

Schéma du coupleur. — Le coupleur est l'organe essentiel de la voiture, parce qu'il commande la dépense de l'énergie que l'on peut ainsi utiliser rationnellement et économiquement. A titre d'exemple, nous décrirons celui de la « General Electric C° (*) », qui permet les combinaisons suivantes (fig. 249) :

0° le circuit des moteurs de la voiture est isolé;

1° la prise de courant est reliée à une résistance de démarrage R disposée en série avec les deux machines elles-mêmes groupées en série, l'inducteur du dernier moteur étant mis en communication avec les rails;

2° une partie de la résistance de démarrage est mise en court-circuit;

3° toute cette résistance est en court-circuit;

4° les enroulements des inducteurs sont en outre shuntés;

(*) OMER DEBAST, *La pratique actuelle des installations de tramways électriques*. (BULLETIN MONTEFIORE, 1895-1896, p. 97.)

5° comme dans la seconde position de la manivelle, les deux machines avec les inducteurs sans shunts sont en série avec la résistance de démarrage réduite;

6° un seul moteur est en circuit avec tout le rhéostat de démarrage;

7° la résistance de celui-ci est réduite;

8° les deux moteurs sont groupés en dérivation à la suite de la résistance de démarrage réduite;

9° le rhéostat de la résistance de démarrage est entièrement mis hors-circuit;

10° les enroulements des inducteurs sont munis de leurs shunts.

Les combinaisons 1 et 2 ne doivent être utilisées que pour le démarrage; de même les groupements 5, 6, 7 et 8 ne sont que transitoires, leur intermédiaire ayant seulement pour but de graduer le passage d'un régime au suivant, afin d'éviter les chocs. Les vitesses de régime sont réalisées de préférence en maintenant la manivelle de manœuvre dans les positions 3, 4, 9 et 10, qui suppriment toute résistance en série avec les machines et fournissent par suite les conditions de marche les plus économiques. Le rhéostat de démarrage est d'ailleurs peu important, le groupement en série initial des moteurs réduisant de moitié la différence de potentiel appliquée aux bornes de chacun d'eux. Avec des moteurs de 20 chevaux et une tension de distribution de 500 volts, la « General Electric C° » emploie un rhéostat de démarrage de 6,1 ohms dont la résistance peut être réduite à 1,1 ohm et le shunt dérivé sur l'enroulement inducteur de chaque machine mesure 1,2 ohm.

Ces résistances, disposées sous la caisse de la voiture, sont constituées de bandes en fer isolées par l'intermédiaire de lanières en asbeste et serrées dans un châssis isolant et incombustible.

Voyons maintenant comment sont réalisés les divers groupements de la figure 249. Pour faciliter la lecture du schéma, développons dans un plan (à droite et à gauche de la fig. 250) les arcs métalliques des deux cylindres isolants que la rotation

des manivelles amène en contact avec les balais suivant les lignes pointillées.

Renversement de marche. — Les induits A_1 et A_2 des moteurs se raccordent respectivement aux balais B′, C′; F′, G′; les inducteurs I_1, I_2 avec leurs shunts S_1, S_2 respectivement

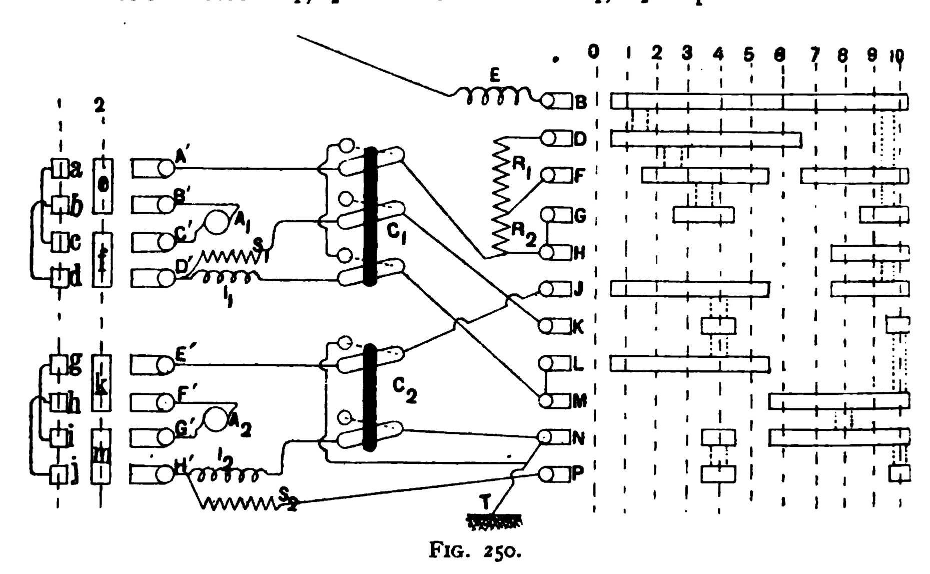


Fig. 250.

aux bornes D′ et H′. Si le cylindre de changement de marche établit les contacts suivant la ligne 1, le courant arrivant en A′ passe par le balai adjacent au plot *a*, est conduit au plot *c*, passe au balai C′, entre dans l'induit A_1, vient en B′, *b*, *d*, D′ et l'inducteur I_1. De même dans le circuit du second moteur, le parcours est E′, *g*, *i*, G′, A_2, F′, *h*, J, H′, I_2.

Quand la ligne de contact est établie suivant 2, de A′ le courant suit *e*, B′, traverse A_1 *en sens inverse*, arrive en C′, *f*, D′, I_1. Le courant se trouve de même renversé dans le second induit A_2.

Modification de régime. — Le premier balai du grand cylindre se raccorde au souffleur magnétique E. En supposant les balais B, D, F, ... appliqués successivement suivant les lignes de contact 1, 2, 3, ... on verrait aisément que la série

des connexions de la figure 249 se trouve effectivement réalisée.

Suppression d'un des moteurs. — Enfin, des commutateurs à trois et deux manettes C_1, C_2, permettent de retirer momentanément du circuit un moteur défectueux, de manière à pouvoir rentrer la voiture à l'usine, malgré des avaries graves, sans devoir recourir à des auxiliaires quelconques.

Une seule paire de manivelles sert alternativement pour les coupleurs des deux plates-formes, afin d'éviter que des voyageurs ne puissent manœuvrer l'appareil d'arrière. Les manivelles ne peuvent d'ailleurs être retirées que si elles ont été au préalable amenées dans la position de repos.

Appareils accessoires. — La liaison du trolley aux souffleurs magnétiques se fait par l'intermédiaire de deux inter-

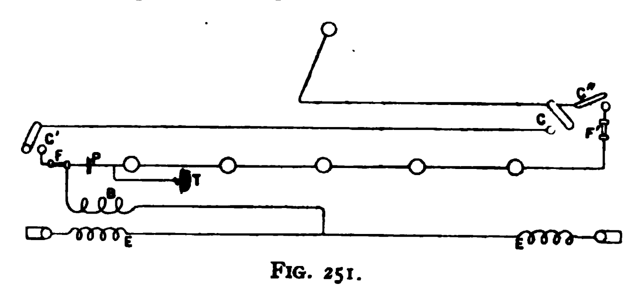


Fig. 251.

rupteurs généraux C, C′ (fig. 251), un fusible F, un parafoudre P et sa bobine de réaction B. Le circuit se subdivise alors en deux dérivations allant aux souffleurs.

Les interrupteurs C et C′, montés en série, sont disposés au plafond des plates-formes, à portée du conducteur de la voiture qui a pour consigne de les ouvrir chaque fois qu'il quitte son poste de service.

Enfin, l'éclairage de la voiture est assuré par un circuit d'éclairage comportant cinq lampes incandescentes à 110 volts montées en série, protégées par un fusible F′, commandées par l'interrupteur C″ et raccordées aux rails en T.

Quand le courant vient à manquer à la voiture, le conducteur doit mettre la manivelle principale au cran de repos, fermer l'interrupteur C″ et attendre que la lumière des

lampes l'avertisse que le fil est redevenu actif. Afin d'éviter que toutes les voitures ne démarrent en même temps et surchargent l'usine et les circuits, les conducteurs des voitures ne doivent se remettre en marche que dans un certain ordre prévu une fois pour toutes.

CANIVEAU.

L'emploi des conducteurs aériens a rencontré dans quelques grandes villes une opposition motivée par le souci de l'esthétique des rues. On a donc dû recourir à des systèmes dans lesquels le conducteur est souterrain. Avec le caniveau, les conducteurs d'amenée du courant, poutrelles en fer, sont portés par des isolateurs spéciaux à l'intérieur d'un caniveau en béton renforcé par une ossature en fer. Une charrue rattachée aux voitures s'introduit dans la fente longitudinale du caniveau, et deux frotteurs tirés par des ressorts viennent s'appliquer sur les conducteurs par lesquels se font exclusivement l'arrivée et le départ du courant.

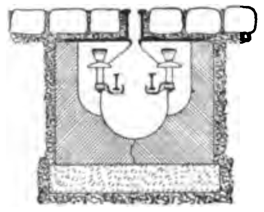


Fig. 252.

Le système à caniveau est extrêmement coûteux de premier établissement et donne lieu à des frais d'entretien et de réfection très élevés.

CONTACTS SUPERFICIELS.

Pour s'affranchir du coûteux caniveau, on a imaginé des systèmes dans lesquels le courant est capté sur des pavés métalliques à fleur du sol, placés dans l'axe de la voie. Par un jeu automatique de commutateur, ou par l'attraction d'un noyau magnétique, les pavés ne doivent être mis en rapport avec les générateurs d'électricité, qu'au moment où la voiture les couvre, ceci par raison de sécurité pour la circulation et pour limiter les dérivations.



Fig. 253.

Ces dispositifs sont, en général, compliqués. Leur coût est intermédiaire entre celui du caniveau et du trolley; ils sont peu répandus.

§ 3. — ALIMENTATION INDIRECTE.

TRACTION PAR ACCUMULATEURS.

Les divers procédés que nous venons d'étudier jusqu'ici ne sont pas toujours applicables, soit par suite de circonstances locales comme la multiplicité de canaux, soit à cause des exigences des municipalités.

On recourt alors à la traction par accumulateurs, à laquelle les progrès de l'automobilisme assurent, dès maintenant, un énorme débouché. Chaque voiture porte, soit sous les banquettes, soit sous le châssis, une batterie pour l'alimenter. Deux cas sont à distinguer suivant que les éléments sont à charge lente ou à charge rapide.

Charge lente. — Le plus grand obstacle à l'emploi des couples secondaires en traction, indépendamment des qualités de résistance au choc fort, difficiles à réaliser, et du temps considérable exigé pour le rechargement, a été le grand poids auquel on doit consentir lorsque les pentes à gravir atteignent une inclinaison un peu notable, ou lorsque le parcours à effectuer sans rechargement comporte un nombre élevé de kilomètres. Cependant, les accumulateurs spécialement étudiés pour la traction dans ces dernières années, réalisent des progrès notables; on arrive maintenant à des poids très admissibles.

Charge rapide. — Pour éviter la manutention pénible et coûteuse qu'exige l'enlèvement de la batterie des voitures pour son rechargement et la réserve importante d'accumulateurs nécessaire, on a été amené à utiliser des batteries placées à demeure dans les voitures, mais qui doivent être dès lors susceptibles d'être rechargées en un temps fort court, 15, 10 et même 5 minutes pendant l'arrêt aux terminus.

On arrive à ce résultat en donnant aux plaques une très grande surface et les préparant électrolytiquement sans oxydes rapportés. Ces derniers, par le grand foisonnement qui résulte des débits excessifs, se désagrégeraient en effet rapidement. Les accumulateurs sont chargés en les soumettant à une tension constante de 3 volts environ par élément. Le courant, très intense au début, va en s'affaiblissant au fur et à mesure de l'accroissement de la force contre-électromotrice.

Par exemple, la ligne La Madeleine (Paris) à Courbevoie et Neuilly a ses voitures pourvues de 200 éléments Tudor à charge rapide de 18 kilogrammes chacun, chargés aux terminus au moyen d'une prise de courant à cordon souple, sous l'intensité moyenne de 120 ampères, pendant 7, 8 ou 10 à 12 minutes selon l'état de la batterie.

Les éléments sont soudés et logés à poste fixe sous les banquettes en 4 rangées de 50 éléments.

Calcul de la capacité nécessaire. — Prenons le cas d'une automobile de route (*) consommant par tonne-kilomètre environ 85 watts-heures (**) et que l'on équipe, d'ordinaire, au moyen de 44 éléments fournissant la différence de potentiel moyenne disponible aux bornes, de 85 volts environ. Il en résulte que la dépense est d'environ 1 A-H par T-km ou 0,001 A-H par kg-km.

Soit K le rapport du poids de la voiture en ordre de marche, au poids P kg de la batterie. La voiture pèsera au total KP kg et, puisque 1 kg-km exige 0,001 A-H, elle nécessitera 0,001 KP A-H pour parcourir un kilomètre.

Si, d'autre part, la capacité d'un élément est Q par kg total, chaque élément, qui pèse $\frac{P}{44}$, aura une capacité $\frac{QP}{44}$ A-H. Cette capacité permettra un trajet m km donné par l'équation

$$\frac{QP}{44} = 0{,}001\,KPm \quad \text{ou} \quad Q = 0{,}044\,Km \quad \text{ou encore} \quad m = \frac{22{,}7\,Q}{K}.$$

(*) F. Loppé, *Capacité à donner aux batteries d'accumulateurs des voitures électriques*. (Électricien, t. XX, 1900, p. 10.)

(**) Terrain plat, excellent macadam.

Dans les voitures ordinaires, K est généralement compris entre 3 et 3,5. Si nous prenons des accumulateurs Cheval-Lindeman, par exemple, fournissant 20 A-H par kg total, la voiture pourra parcourir pour K = 3,25

$$\frac{22,7 \cdot 20}{3,25} = 140 \text{ km.}$$

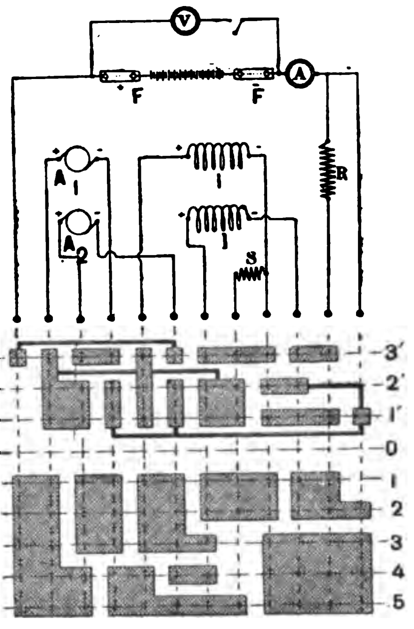


Fig. 254.

Coupleur. — Le coupleur utilisé dans les voitures est analogue à celui des tramways à trolley, sauf qu'il ne comporte en général qu'un seul cylindre. FF (fig. 254) sont les fusibles protégeant la batterie, A l'ampèremètre, V le voltmètre, A_1 et A_2 les induits et I, I, les inducteurs des moteurs, S le shunt des inducteurs, enfin R la résistance de démarrage.

Dans la position 1, les moteurs sont placés en tension avec R : c'est le démarrage. Au cran 2, le rhéostat est supprimé et reste dès lors supprimé. Cran 3 : les deux induits sont en série, les deux inducteurs en dérivation. Cran 4 : les deux moteurs (induits et inducteurs) sont en dérivation l'un sur l'autre. Cran 5 : les deux induits sont placés en dérivation, de même que les deux inducteurs en outre shuntés.

Si, au lieu de tourner le coupleur dans le sens 1, 2, 3, ..., on tourne en sens inverse, on produit le freinage électrique, puis le renversement de la marche. Cran 1', premier freinage : les deux induits, en dérivation l'un sur l'autre, sont mis en circuit avec R et leurs inducteurs shuntés par S ; la batterie est coupée. Cran 2', second freinage : idem, sauf que R est supprimée. Cran 3', marche arrière : la batterie est en circuit

avec le rhéostat R et les deux moteurs, dont les induits sont inversés.

§ 4. — AVANT-PROJET D'UN TRAMWAY ÉLECTRIQUE.

On devra en tout premier lieu dresser un plan d'ensemble du réseau et les profils cotés en long des lignes à construire. Le type des voitures à employer sera arrêté, puis on déterminera la vitesse commerciale, la fréquence des départs sur chaque ligne et la durée des stationnements des voitures à chaque extrémité de ces lignes et aux divers arrêts.

Nombre de voitures nécessaire. — Soient : L km la longueur de la ligne, V km à l'heure la vitesse moyenne des voitures, d la durée totale en minutes des stationnements, D minutes la durée de marche pendant un parcours aller ou retour. La durée totale d'un trajet complet de la ligne, aller et retour, sera $\Delta = 2D + 2d$.

t étant l'intervalle de temps en minutes séparant les départs, il faudra $\frac{\Delta}{t} = n$ voitures en service.

Chaque voiture parcourt continuellement la ligne. En un trajet complet aller et retour, elle fait 2L km. Or, elle effectue en une heure $\frac{60}{\Delta}$ trajets complets, soit un parcours $\frac{2L60}{\Delta} = N$ km.

Puisque en régime les n voitures se trouvent exactement dans ce cas, le parcours total pendant chaque heure est de Nn kilomètres-voitures.

Exemple numérique. — Soit une ligne de 11 kilomètres parcourue par des voitures roulant à 14 kilomètres à l'heure. La durée totale des stationnements pour un demi-parcours est de 8'; il y a des départs toutes les 7',5.

$$L = 11, \qquad V = 14, \qquad d = 8, \qquad t = 7,5.$$

Le temps exigé en minutes par le parcours des L km sera

$$D = \frac{L \,.\, 60}{V} = 47',2. \text{ Donc } \Delta = 2.47,2 + 2.8 = 110',4.$$

Le nombre de voitures en marche

$$n = \frac{110,4}{7,5} = 14,7 \text{ soit } 15.$$

Chaque voiture parcourt en une heure

$$\frac{2 \cdot 11 \cdot 60}{110,4} = N = 11,95 \text{ km.}$$

Effort moyen de traction. — Nous avons vu que l'effort de traction capable de vaincre la résistance au roulement d'une voiture de p kg est $f_1 = pk$, k étant, par kg la résistance au roulement en palier et alignement droit que l'on se fixe d'avance, d'après la nature de la voie. Ce terme est donc connu.

Dans les rampes de pente i, i', ..., un supplément d'effort pi, pi', ... est nécessaire sur toute la longueur l_2, l'_2, ... de ces pentes. Ce supplément d'effort représente, par rapport au trajet total de la ligne, un effort moyen déduit de l'équation

$$2Lf'_2 = \Sigma pil_2, \quad \text{d'où} \quad f'_2 = \frac{p\Sigma il_2}{2L}.$$

Σil_2 se tirera aisément du profil de la ligne. On prendra la valeur de toutes les pentes et rampes et les multipliera par leur longueur; on fera leur somme. Dès lors l'équation précédente permet de déterminer f'_2.

On répartira de même sur le trajet total, l'effort exigé par les démarrages et, éventuellement, celui nécessaire pour vaincre la résistance de l'air.

Dès lors, l'effort moyen total F à développer est connu.

Puissance motrice des voitures. — Si η_t est le rendement de la transmission, le travail à développer sur l'axe du ou des moteurs pour effectuer un kilomètre sera

$$\frac{1\,000}{\eta_t} \text{ F kgm.}$$

Mais en une heure, une voiture parcourt N km. Le travail à dépenser par véhicule-moteur pendant ce laps de temps sera conséquemment

$$\frac{1\,000 \text{ FN}}{\eta_t} \text{ kgm,}$$

soit une puissance de

$$\frac{1\,000\,FN}{\eta_t \,.\, 75 \,.\, 3\,600} = W \text{ chevaux.}$$

EXEMPLE. — Admettons des voitures de 10 tonnes et $F = 18$ kg; $\eta_t = 0{,}9$. Dans le cas examiné précédemment, nous avons trouvé $N = 11{,}95$. La puissance moyenne que devront développer les moteurs sur leur axe ressortira à 8,85 chevaux, en vertu de la formule précédente. Pour assurer des démarrages rapides, il conviendra de majorer considérablement cette valeur. On adoptera par exemple deux moteurs de 15 chevaux. Si la ligne présente des parties très accidentées, on sera amené à augmenter encore cette puissance.

Puissance de l'usine. — En appelant η_m et η_c le rendement des moteurs et de la canalisation, la puissance moyenne que devra développer l'usine pour alimenter chaque voiture sera

$$\frac{W}{\eta_m \eta_c} \text{ et pour les } n \text{ voitures } \frac{Wn}{\eta_m \eta_c}.$$

Reprenons les données précédentes : $W = 8{,}85$ chevaux; $n = 14{,}7$ voitures; $\eta_m = 0{,}7$; $\eta_c = 0{,}8$. La puissance moyenne que devra développer l'usine sera

$$\frac{8{,}85 \,.\, 14{,}7}{0{,}7 \,.\, 0{,}8} = 232 \text{ chevaux,}$$

que l'on portera à 300 chevaux pour parer aux irrégularités du trafic. On pourra réaliser cette puissance au moyen de deux génératrices de 150 chevaux chacune.

Possédant le plan de la ligne et connaissant la position de l'usine, on déterminera le tracé des artères, en tenant compte des conditions locales. Leur section sera calculée d'après une des règles précédemment indiquées. Comme fil de trolley on admettra le diamètre courant maximum de 8,25 mm. pour tenir compte de l'usure; les rails seront soudés si possible.

CHAPITRE XIX

TÉLÉGRAPHIE (*)

La télégraphie a pour objet de transmettre au loin la pensée, au moyen de signaux. On la réalise électriquement par l'intermédiaire de transmetteurs, de lignes et récepteurs.

Le transmetteur sert à la production de courants électriques déterminés; la ligne, matérielle ou non, les transmet; le récepteur, sous l'influence des courants reçus, émet des signaux qui sont traduits ou que l'on traduit en langage ordinaire.

SYSTÈME MORSE.

Nous nous occuperons exclusivement du système télégraphique le plus simple et d'ailleurs le plus répandu, inventé par l'américain Morse.

Transmetteur. — Le transmetteur, idéalement simple, se compose d'un *manipulateur* constitué par une réglette en cuivre AB reliée à la ligne L, pivotant autour d'un axe C et sollicitée par le ressort *r* à s'appuyer d'une manière permanente sur le contact de repos F, en relation avec le récepteur G mis d'autre part en connexion avec la terre. Quand on presse sur le bouton en substance isolante D, la réglette AB bascule et quitte F, pour venir prendre contact avec le bloc E relié à un des pôles de la pile

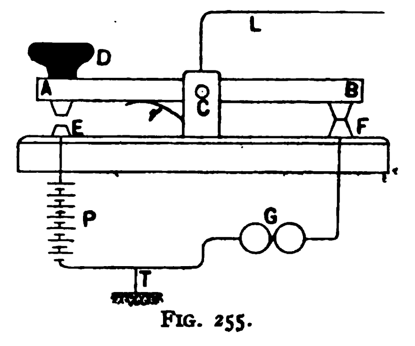


FIG. 255.

(*) THOMAS, *Traité de télégraphie électrique.* Paris, Baudry et Cie.

dont l'autre pôle est à la terre. Un courant est alors envoyé sur la ligne, traverse le récepteur en correspondance et revient par la terre.

Une bonne terre est constituée par deux plaques en zinc d'un mètre carré (une à chaque poste) enfouies dans le sol humide et réunies par celui-ci.

Récepteur. — Le récepteur comporte un électro-aimant H (fig. 256) mis d'un côté en rapport avec la ligne L, de l'autre avec la terre, comme nous venons de le dire. Son armature I peut osciller autour d'un axe V. Ses oscillations sont limitées par les vis-buttoirs K_1, K_2. Elle est sollicitée vers le haut par un ressort J dont la tension se règle au moyen d'une vis K.

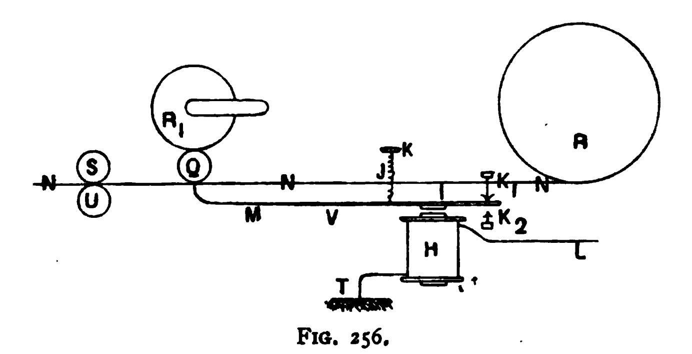


Fig. 256.

Enfin, de l'autre côté de V, elle se termine par un ressort recourbé M. Une bandelette N de papier, enroulée sur un rouet R, est sollicitée à se dérouler par les rouleaux S et U entre lesquels elle passe, lorsqu'on déclenche le mouvement d'horlogerie dont ils font partie. La bandelette N défile au-dessus de M et sous la molette Q encrée continuellement d'aniline par le rouleau encreur R_1.

Lorsqu'un courant d'intensité suffisante traverse H, l'armature I est attirée ce qui fait relever M et appliquer la bandelette N contre Q, laquelle trace une ligne sur la bande, tant que l'attraction persiste.

Si le courant envoyé a été bref, c'est-à-dire si le manipu-

lateur n'a fait que toucher un instant le plot de travail, la molette n'aura tracé qu'un point; si l'action du manipulateur a été prolongée, le courant aura passé pendant une durée plus grande, c'est un trait que la bandelette enregistre. Ceci suffit pour assurer la transmission du langage, à condition de représenter les diverses lettres de l'alphabet par une combinaison de points et de barres. Voici le commencement de l'alphabet Morse :

a	· —	*é*	· · — · ·
b	— · · ·	*f*	· · — ·
c	— · — ·	*g*	— — ·
d	— · ·	*h*	· · · ·
e	·	*i*	· ·

La longueur d'une barre est de trois points. L'intervalle doit être d'un point entre chaque signe point ou trait, de deux points entre chaque lettre et de trois points entre chaque mot.

La transmission est lente; l'effet utile ne dépasse guère 25 mots par minute.

Réception à l'ouïe. — Il n'est pas indispensable que les signaux soient écrits sur la bandelette. Avec un peu d'habitude, l'employé arrive à les lire à l'ouïe et le travail y gagne, non seulement en rapidité, mais en exactitude ; l'expérience l'a prouvé. Pour ce qui concerne la rapidité, on arrive à recevoir 27 à 30 mots.

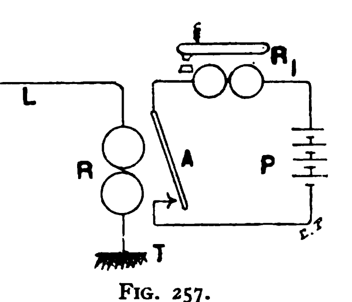


Fig. 257.

Relais et parleurs. — Le récepteur Morse ordinaire fournit en général des sons trop faibles pour permettre d'assurer dans de bonnes conditions la réception à l'ouïe. On l'utilise alors comme relais. Son armature A (fig. 257) ferme, lorsqu'elle est attirée, un circuit local contenant une pile P et un *parleur* R_1.

Celui-ci est un électro-aimant E (fig. 258) dont l'armature DCB, *lourde*, émet des sons très forts. On est d'ailleurs maître d'augmenter à volonté l'intensité du courant local, et par suite l'intensité des sons. On règle la position de l'armature au moyen d'un ressort R et d'une vis G.

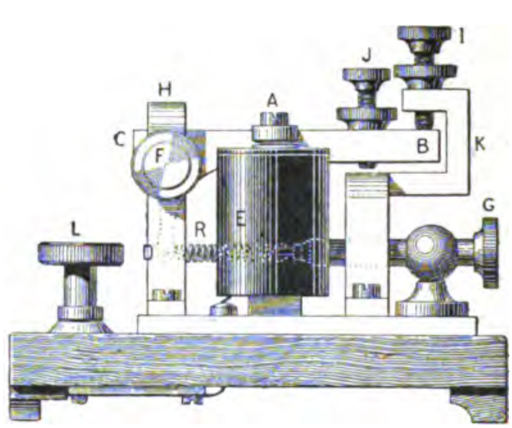
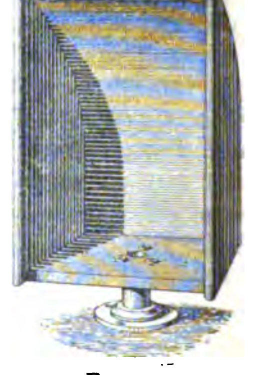


Fig. 258.

Dans les installations nouvelles des grands bureaux, le récepteur à bande disparaît pour faire place à un véritable relais dont l'armature légère peut être aisément réglée et donne des contacts sûrs et stables.

Suivant le nombre de parleurs alimentés et l'intensité du trafic, la pile P comporte une ou plusieurs séries de quatre éléments mises en dérivation l'une par rapport à l'autre. La résistance de l'appareil auditif est de 80 ohms; celle du récepteur à bande varie entre 200 et 500.


Fig. 259.

Le parleur est fréquemment placé dans une caisse de résonance (fig. 259), qui renforce les sons et les réfléchit vers l'opérateur.

Appareils d'appel. — Sonnerie vibrante. — L'appareil d'appel le plus communément employé est la sonnerie vibrante, constituée par un électro-aimant EE (fig. 260) dont l'armature A est mobile, montée sur un ressort R et terminée

à son extrémité opposée par un battant B placé près d'un timbre T.

Les fils de l'électro EE se raccordent d'un côté à la borne B_1, de l'autre à l'armature R par l'intermédiaire de la carcasse métallique de l'appareil. La lame-ressort R, pourvue d'une rondelle platinée, vient s'appuyer au repos sur une pointe platinée terminant l'extrémité de la vis V, en rapport d'autre part avec la borne B_2.

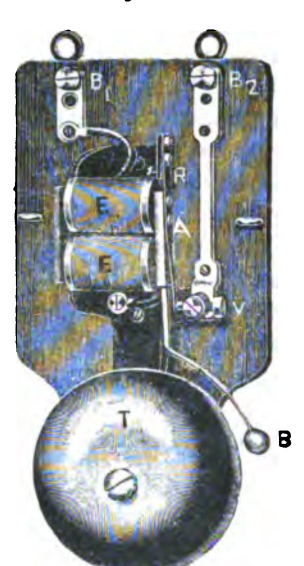


Fig. 260.

Quand un courant d'intensité suffisante (en pratique 0,15 à 0,2 A) traverse les bobines de l'électro, l'armature est attirée et son battant frappe le timbre; en même temps le courant a été coupé, l'attraction a disparu et l'armature, sollicitée par le ressort, revient prendre sa position de repos. Le courant se rétablit, l'armature est attirée derechef et ainsi de suite.

Il suffit d'une couple d'éléments Leclanché pour faire fonctionner une sonnerie ordinaire.

Annonciateurs. — Les lignes sont en général mises en rapport avec un annonciateur, qui a pour but de fournir une indication visuelle des appels, concurremment à une indication sonore s'il y a lieu. Il comporte un électro-aimant B (fig. 261) à un ou deux noyaux, pourvu d'une armature C oscillant autour d'un axe O, se repliant à angle droit pour venir retenir par un petit ergot E un *volet* d'annonciateur F en métal non magnétique, pivotant à sa base autour d'un

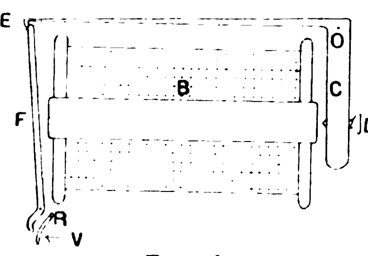


Fig. 261.

axe de rotation et légèrement incliné vers l'avant, de manière à basculer autour de son axe dès que l'ergot de retenue E cesse de le soutenir.

Quand un courant traverse la bobine B, l'armature C est attirée, l'ergot E se soulève et laisse tomber le volet qui découvre le numéro de la ligne à laquelle il correspond et ferme, par une expansion qu'il porte à sa partie inférieure, le circuit d'une sonnerie vibrante, en appliquant la paillette métallique R contre un contact réglable V.

La vis D sert à écarter plus ou moins l'armature C du noyau de l'électro, de manière à régler la sensibilité.

Appareils de vérification. — GALVANOSCOPE ET MILLIAMPÈREMÈTRE. — Pour s'assurer si le courant passe avec l'intensité voulue, on intercale dans le conducteur raccordant les manipulateurs aux lignes un galvanoscope ou mieux un milliampèremètre.

Commutateur suisse. — Le commutateur principalement employé en télégraphie est le commutateur suisse (fig. 262), constitué par deux séries de lames parallèles en cuivre, placées à angle droit dans deux plans parallèles distants d'environ 1 centimètre. La série d'avant est horizontale, celle d'arrière verticale. Aux points de croisement des lames, les premières sont percées d'un trou cylindrique avec encoche E (fig. 263); les secondes, d'un trou conique de plus petit diamètre. On réunit une lame horizontale à une lame verticale,

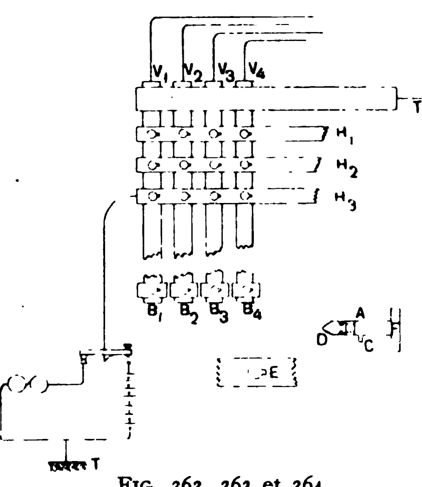


FIG. 262, 263 et 264.

par l'insertion de fiches constituées comme l'indique la figure 264 : une partie cylindrique A ayant à peu près le diamètre des trous des lames horizontales, se termine d'un côté par une pointe conique poussée par un ressort; de l'autre côté, par une poignée F. Une goupille C, qui peut passer dans l'encoche des trous, puis former arrêt, est fixée latéralement à une distance déterminée de F. On enfonce la fiche dans le trou, de manière que l'arrêt C dépasse la lame horizontale, puis on exerce un mouvement de rotation, ce qui assure l'invariabilité de la position de la fiche, dont la pointe D est, d'autre part, comprimée dans le logement conique que présente la lame verticale en regard. Une connexion intime des deux lames est ainsi obtenue. Aux lames verticales se raccordent les lignes, aux lames horizontales les appareils. La dernière lame horizontale est découpée en autant de blocs qu'il existe de lames verticales; ces blocs se relient aux annonciateurs. Dans la position d'attente, des fiches fixées dans les blocs établissent la communication entre les lignes et les organes d'appel.

Quand des appels sont reçus il suffit, pour se mettre en communication avec l'appelant, de déplacer la cheville et de l'introduire dans une lame horizontale en rapport avec un manipulateur.

Pour réunir deux lignes entre elles, par exemple, les circuits aboutissant en V_1 et V_4, il suffira d'insérer deux fiches à leurs points de croisement avec une lame horizontale quelconque non raccordée à un appareil et, si l'on veut intercaler un relais dont les extrémités aboutissent à deux lames horizontales, ce seront les points de croisement de ces lames avec celles de lignes que l'on mettra à contribution.

Au-dessus du commutateur se trouve une grande plaque T mise sur terre, séparée de la série des lames verticales par une feuille de papier et formant parafoudre.

La fiche décrite ci-dessus est du système Richez. Quand on ne dispose que de simples chevilles pleines, les lames d'arrière ne sont attachées que par leur extrémité supérieure, de manière à former ressort.

Générateurs utilisés. — Les courants télégraphiques Morse varient entre 0,010 et 0,015 A. On les produit généralement au moyen d'éléments du type Leclanché.

Dans les grands bureaux, on recourt aux accumulateurs ; enfin dans les très grandes installations, l'énergie électrique nécessaire est engendrée par des dynamos. On donne à celles-ci des voltages appropriés aux divers groupes de lignes à desservir et l'on a soin d'introduire à la suite de chaque générateur, des résistances de sûreté destinées à empêcher le courant de devenir excessif en cas de court-circuit. A Chicago, par exemple, les résistances additionnelles sont comptées à raison de 2 ohms par volt fourni par la dynamo correspondante.

Translateur. — Pour éviter l'emploi de piles trop puissantes et les fortes dérivations que provoquerait l'emploi de hauts voltages, on subdivise les très longues lignes en sections desservies par des postes intermédiaires, pourvus de relais doubles appelés *translateurs*, constitués comme l'indique la figure 265.

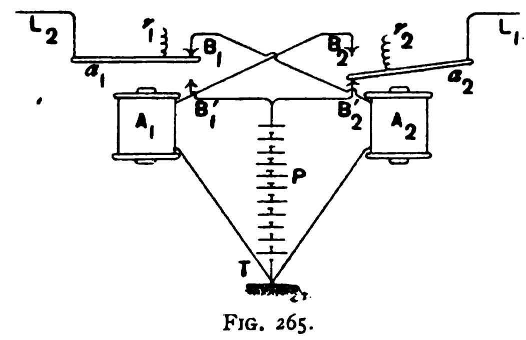


FIG. 265.

A_1 et A_2 sont des électro-aimants raccordés d'un côté à la terre et d'autre part aux butoirs de repos B_2 et B_1 contre lesquels appuient leurs armatures a_1 et a_2, sous l'action des ressorts r_1, r_2. En face de ces butoirs s'en trouvent d'autres B'_1, B'_2, limitant la course des armatures et reliés à une pile.

Quand un courant est transmis sur la ligne L_2, l'électro-aimant A_2 s'aimante, l'armature a_2 est attirée et vient prendre contact avec B'_2, ce qui connecte L_1 avec la pile P et envoie sur le tronçon suivant le courant d'intensité nécessaire.

Relais polarisé. — Pour se mettre à l'abri des irrégularités que peuvent causer le magnétisme rémanent et l'hystérésis des noyaux, la maison Siemens a adopté une disposition qui assure l'obtention d'un état magnétique bien défini de ceux-ci et, comme corollaire, maintient un fonctionnement très régulier de l'appareil. A cet effet, les deux noyaux des électros A_1, A_2 (fig. 266), sont réunis par une armature BC. Sur le milieu de celle-ci, s'applique l'extrémité polaire d'un aimant permanent D recourbé à angle droit. L'armature mobile est rattachée à la partie verticale de l'aimant permanent. Lorsqu'elle se trouve dans le plan de symétrie des électros, elle est dans un état d'équilibre instable.

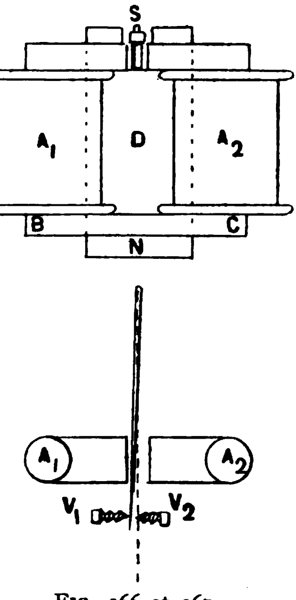


Fig. 266 et 267.

Dès lors si, au moyen d'une vis-butoir V_2 (fig. 267), on la maintient hors de cette position et limite sa course du même côté de la ligne de symétrie par une seconde vis-butoir V_1, l'armature restera normalement appliquée contre celle-ci, sous l'action prépondérante qu'exerce l'électro correspondant A_1; et il faudra qu'un courant de sens et d'intensité convenables traverse les électros, pour projeter l'armature contre la vis V_2.

Les connexions sont établies comme dans l'appareil précédent; les armatures se relient aux lignes, les butoirs de repos aux électros et ceux d'attaque à la batterie.

Ralentissement de la transmission. — Que le relais soit à rappel par ressort ou par attraction magnétique, la durée de chaque signal se trouve raccourcie du temps que met l'armature à atteindre sa position de travail. La manipulation doit donc être d'autant plus lente, que le nombre de relais empruntés est plus grand.

Amélioration du rendement. — Le système Morse est très employé. Il est fort simple, peu sujet à dérangement, mais la transmission qu'il fournit n'est pas rapide. On double aisément le rendement d'un fil en adoptant le dispositif duplex obtenu, soit au moyen de bobines différentielles, soit par le pont de Wheastone.

Duplex différentiel. — Les électro-aimants récepteurs possèdent deux enroulements bobinés en sens inverse a_1 b_1, a_1 c_1; a_2 c_2, a_2 b_2 (fig. 268) à nombres égaux de spires et représentés sur la figure par de simples quarts de circonférence, pour plus de clarté. Les entrées de ces enroulements sont raccordées entre elles en a_1 et a_2; les sorties avec la ligne et des rhéostats réglables R_1, R_2, sur lesquels on peut, au surplus, dériver des condensateurs S_1, S_2. Les manipula-

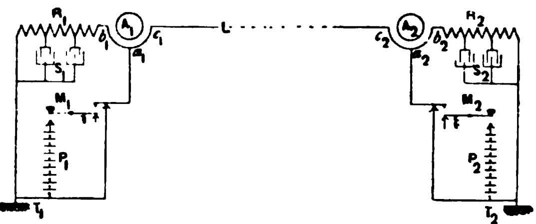


FIG. 268.

teurs M_1, M_2 sont doubles et réglés de manière que la communication avec la terre soit coupée *au moment* où se produit la liaison avec la pile. Le circuit n'est donc jamais interrompu, comme cela a lieu avec les manipulateurs ordinaires.

On règle les récepteurs de chaque poste au moyen des rhéostats R_1 et R_2 et de leurs condensateurs, de manière que lorsque l'un des manipulateurs est abaissé, le récepteur qui lui est conjugué reste inerte. Ceci a lieu quand les rhéostats R_1 et R_2, ainsi que les capacités qui leur sont adjointes, équivalent exactement aux résistances et capacités respectives des circuits $c_1c_2a_2$ et $c_2c_1a_1$ puisque alors les courants sont égaux et de sens contraire dans les enroulements égaux de chacune des bobines différentielles.

Cela posé, le poste 2 étant au repos, si l'on abaisse M_1, l'armature de A_1, reste immobile; au contraire, celle de A_2

s'abaisse, sous l'influence du courant qui traverse le circuit a_1c_1 L c_2a_2 T_2. Et l'on voit que la transmission de M_1 parvient régulièrement en A_2; inversement, celle de M_2 agit en A_1. Enfin, si les deux manipulateurs sont abaissés simultanément, les *deux* récepteurs fonctionnent sous l'effet des courants traversant les enroulements $a_1b_1R_1T_1$ et $a_2b_2R_2T_2$, la ligne n'étant alors le siège d'aucun courant.

Duplex par le pont de Wheastone. — Ici les récepteurs R_1, R_2 sont insérés dans une des diagonales de deux ponts de Wheastone dont A_1, B_1; A_2, B_2 (fig. 269) sont les branches de proportion et S_1, S_2, celles de comparaison. Les manipulateurs M_1, M_2 sont doubles, comme précédemment. On règle

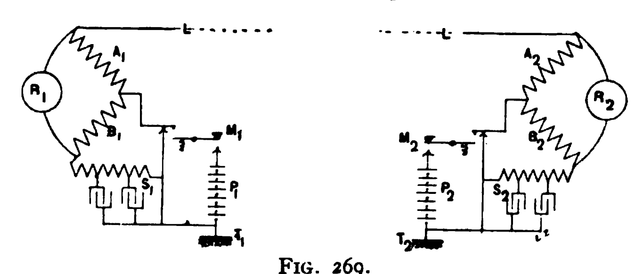


FIG. 269.

les rhéostats variables, munis de condensateurs, de manière que, l'un des deux manipulateurs étant abaissé, le récepteur qui lui est conjugué reste inerte. L'autre est alors actionné et la transmission peut s'effectuer normalement, car si le second manipulateur est abaissé à son tour, le premier récepteur fonctionne aussi, aucun courant ne passant plus dans la ligne L.

Communications directes et indirectes. — Chaque bureau télégraphique est désigné par une abréviation de deux ou trois lettres constituant son indicatif. Les grands centres sont reliés entre eux par des fils directs; les petits ne se raccordent qu'à leurs voisins et la ligne qui les réunit prend le nom de *ligne omnibus*.

Quand un bureau doit envoyer une dépêche à un poste relié par fil direct, il n'y a aucune difficulté. Le bureau émet

de simples signaux d'appel au second qui y répond, et le télégramme peut être échangé.

S'il s'agit, au contraire, de communiquer avec la Nᵉ station d'une ligne omnibus, le bureau transmetteur A appellera le poste suivant B en émettant l'indicatif *du bureau qu'il désire* N. Recevant ces appels, la station B établira immédiatement la communication entre la ligne de A et celle vers C, en laissant dans le circuit un appareil de contrôle : galvanoscope ou parleur, pour lui permettre de se rendre compte de l'état d'occupation de la ligne. A la réception de la demande, le poste C connectera le fil de B à celui vers D et ainsi de suite.

Divers modes d'exploitation. — Dans les pays de faible étendue comme le nôtre, c'est le système des communications directes qui prévaut : le demandeur se fait donner la communication de proche en proche, en empruntant naturellement autant que possible les grands bureaux disposant de fils directs et de relais, pour atteindre enfin la station d'arrivée.

Ce système exige que l'on munisse tous les postes d'une pile équivalente et relativement forte. A condition de disposer d'un grand nombre de conducteurs, il est rapide, ne demande qu'un minimum de main-d'œuvre et expose le moins aux erreurs.

On ne peut l'appliquer dans les grands pays où les télégrammes sont acheminés vers les centres importants, d'où on les *retransmet* au grand centre le plus voisin du poste d'arrivée, qui le transmet enfin à ce dernier.

Lignes à courant continu. — Tout ce que nous venons de voir a trait à des circuits parcourus par des courants intermittents : en temps normal, la ligne n'est le siège d'aucun courant. On réduit ainsi au minimum la dépense de courant, mais on est obligé de munir chaque poste d'une source de courant suffisante pour assurer les transmissions les plus lointaines auxquelles on doit satisfaire. Ceci peut constituer un grand inconvénient, par exemple pour de petits bureaux de chemins de fer ne disposant pas de personnel spécial, ou

pour des installations d'un caractère nettement temporaire, comme des postes militaires de campagne.

Dans ce cas, il y a avantage à concentrer la ou les piles dans le ou les bureaux extrêmes, généralement les plus importants, et la ligne se trouve normalement parcourue par un courant continu. Il conviendra naturellement de recourir alors aux éléments qui permettent un débit constant, comme ceux du genre Daniell.

Dans le poste A (fig. 270), le plot d'attaque du manipula-

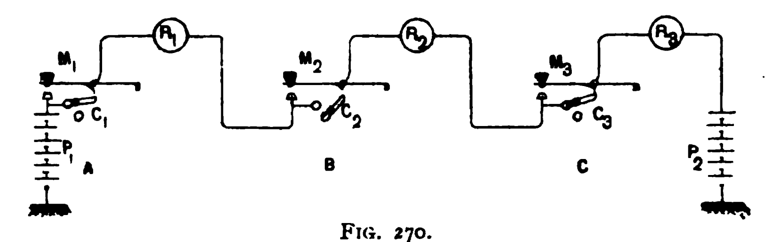


Fig. 270.

teur est en relation avec la pile, et l'axe du manipulateur avec le récepteur, puis la ligne.

Dans les autres postes, la ligne arrive au plot d'attaque des divers manipulateurs, les axes étant reliés aux récepteurs et tronçons de ligne suivants. Un commutateur C_1, C_2, ... permet d'établir un court-circuit entre le plot d'attaque et l'axe de tous les manipulateurs. C'est la position d'attente, et un courant traverse tout le circuit d'une manière permanente.

Quand un poste B, par exemple, veut transmettre, il rompt le court-circuit de son manipulateur par la manœuvre de l'interrupteur C_2 et se trouve dès lors dans le cas général précédemment étudié, si ce n'est que tous les récepteurs sont embrochés dans le circuit et fonctionnent simultanément à chaque émission de courant.

Variante. — Une variante du système consiste à transmettre simplement par rupture du courant traversant continuellement la ligne. Dans ce cas, les commutateurs C_1, C_2, ... disparaissent et les lignes viennent aboutir aux plots de repos des manipulateurs.

CHAPITRE XX

TÉLÉPHONIE (*)

La téléphonie, comme son nom l'indique, est l'art de transmettre les sons au loin.

La transmission de la parole en constitue la principale application; aussi entend-on généralement par téléphonie, l'art de communiquer oralement à distance.

Les porte-voix, les téléphones à ficelle, appartiennent évidemment au domaine de la téléphonie. Nous les passerons sous silence, parce qu'ils ne mettent pas l'électricité en jeu. Remarquons que la téléphonie électrique constitue un cas particulier du transport à distance de l'énergie : elle permet de transmettre des vibrations sonores, les correspondants jouant alternativement le rôle de transmetteur et de récepteur.

Microphone. — En tout premier lieu, il s'agit de produire des courants électriques qui soient la traduction exacte des ondes sonores. On y parvient au moyen du microphone, simplement constitué, en principe, par un contact variable que traverse un courant. Soit un circuit comprenant une pile P (fig. 271) et une capsule remplie de grenailles de charbon. Quand tout est calme dans l'air ambiant, l'intensité du courant traversant le circuit est donnée par la loi d'Ohm $i = \frac{E}{R}$, E étant la force électromotrice de la pile, R la résistance totale du circuit. Le diagramme de l'intensité du courant est représenté par une droite, comme d'ailleurs celui de la pression

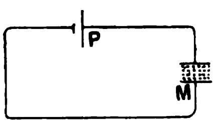


FIG. 271.

(*) PIERARD, *La Téléphonie.*

ambiante. Si un son simple est émis dans le voisinage, les ondes sonores, qui affectent la forme sinusoïdale, viennent impressionner les grenailles.

Pendant la période de compression d'une vibration complète, les grenailles comprimées se resserrent, leur résistance diminue et l'intensité du courant augmente.

Pendant la période de dépression, au contraire, les grenailles s'écartent en vertu de leur élasticité, leur résistance de contact augmente et le courant diminue. Il y a autant de compressions et de dépressions électriques que d'ondes sonores; elles sont accentuées ou non suivant que ces dernières sont énergiques ou pas; le phénomène est continu, de sorte que le diagramme de l'intensité du courant en fonction du temps devient une sinusoïde *abcde*... semblable à la sinusoïde sonore ABCDE... (fig. 272). Par un choix convenable du contact léger constituant le microphone, on arrive à accuser les plus légères vibrations aériennes, ce dont on s'aperçoit en intercalant un récepteur approprié dans le circuit. Pour renforcer l'effet du microphone, on l'insère généralement avec la pile qui l'active, dans le circuit primaire d'une bobine d'induction (fig. 273).

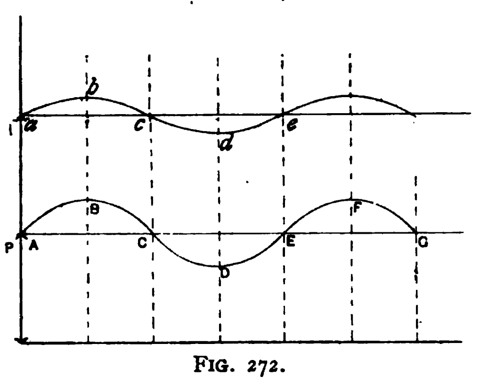


Fig. 272.

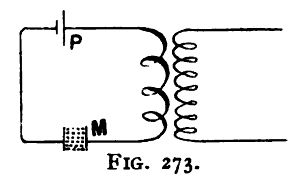


Fig. 273.

Le circuit primaire comporte donc la pile P, le contact microphonique M, l'enroulement à gros fil de la bobine. Il est peu résistant, et ainsi les variations de résistance du microphone sont très marquées par rapport à la résistance de ce circuit, ce qui provoque de grandes variations dans le débit de la pile et, par suite, la naissance de différences de potentiel

relativement grandes aux bornes du circuit secondaire. Le courant ondulatoire du circuit (fig. 271) se trouve ainsi remplacé par un courant alternatif semblable.

Microphone Hughes. — Il est constitué par deux planchettes placées d'équerre (fig. 274), l'une servant de socle à l'autre. La planchette verticale porte deux petits blocs de charbon B, B, évidés sur leurs faces horizontales en regard et supportant par leurs évidements un cylindre de charbon C effilé à ses extrémités. Le courant est amené à un bloc et sort par l'autre.

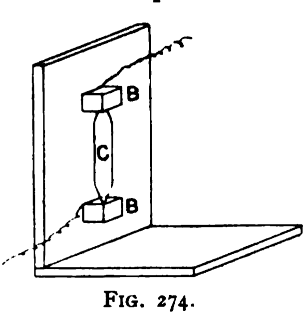


Fig. 274.

Le microphone Hughes et ses dérivés à baguettes de charbon : Ader, Dejongh, ... ont l'inconvénient de présenter une faible résistance (quelques ohms), ce qui affaiblit rapidement la pile et par suite la transmission. En outre, de fortes vibrations de la plaque portant les charbons provoquent des ruptures totales du circuit qui produisent des *crachements* désagréables dans les récepteurs; les étincelles consécutives à ces ruptures encrassent les charbons et exigent des nettoyages fréquents. Ces inconvénients ont favorisé la vogue dont jouissent aujourd'hui les microphones à grenailles ou granules plus puissants, plus nets et moins sujets à se dérégler. Nous en décrirons deux couramment employés en Belgique.

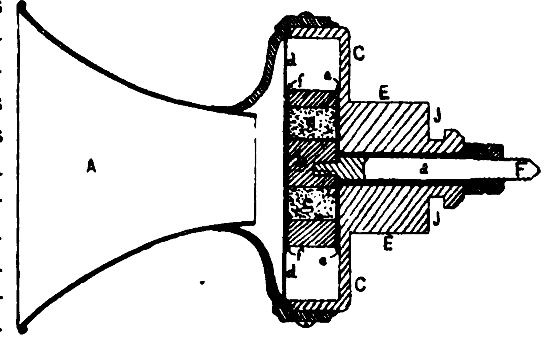


Fig. 275.

Microphone Grünenwald. — Au fond d'un pavillon métallique A (fig. 275), se trouve encastré sur tout son pourtour

un disque en métalou en charbon. Le charbon donne de meilleurs résultats que les métaux. Ce disque se trouve placé très près d'un bloc en charbon *b*, percé de cinq ouvertures cylindriques *c* remplies de grenailles de charbon. Les parties pleines du bloc de charbon sont d'ailleurs recouvertes d'une feuille de papier *ff* en regard de la membrane vibrante, pour assurer l'isolement entre ces deux organes. Les grenailles viennent reposer contre la plaque vibrante, mais ne peuvent tomber, à cause de la faible distance existant entre le disque et le bloc. Ce dernier est fixé sur une tige *a* isolée de la cuvette CC par un cylindre en ébonite. Le courant est amené par une lame-ressort portant une rondelle platinée s'appuyant sur la pointe F platinée de la tige porte-bloc d'une part, et sort par l'intermédiaire d'une fourche métallique engagée dans la rainure JJ, d'autre part. L'épaulement cylindrique EE est engagé à frottement doux dans la planchette-support, de sorte que la fourche dont il vient d'être question assure en même temps la fixation de l'appareil.

MICROPHONE DELVILLE. — Sa constitution générale est

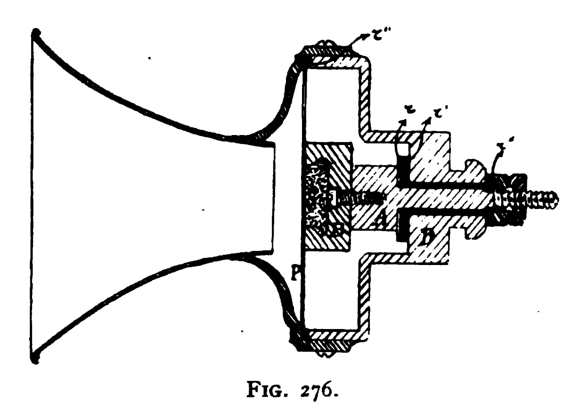


FIG. 276.

identique, mais le charbon B est percé d'une seule cavité centrale C, et, au lieu de grenailles, il est fait usage de granules.

Renforcement de la transmission. — Il semblerait que pour renforcer la transmission, il suffise d'augmenter le nombre des éléments activant le microphone. En réalité il y a peu à gagner dans cette voie. Bien que les deux transmetteurs que nous venons de décrire aient une résistance de 10 à 15 ohms, ils deviennent trop sensibles et donnent aisément lieu à des résonances parasites nuisibles, quand on les alimente par plusieurs éléments. La puissance de la transmission qu'ils fournissent avec un bon élément, sec par exemple, ne laisse d'ailleurs rien à désirer.

Téléphone. — Le téléphone transforme en ondes sonores les courants variables qui l'activent.

Récepteur a main. — Il comprend un aimant en fer à cheval AA (fig. 277) sur les pôles duquel sont fixés des noyaux en fer doux que chaussent des bobines BB de fil fin. Une plaque circulaire en fer doux CC, encastrée sur son pourtour dans une gaine en ébonite ou partiellement métallique qui enveloppe l'aimant et les bobines, se trouve fixée à une faible distance des noyaux en fer doux. Enfin une vis V permet de régler l'appareil, en éloignant ou rapprochant l'aimant de la plaque.

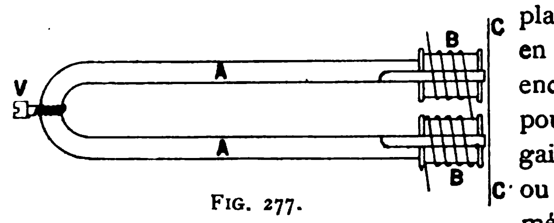


Fig. 277.

Lorsqu'un courant croissant traverse les bobines, le magnétisme de leurs noyaux est renforcé par exemple, les molécules de la plaque CC quittent leur position d'équilibre et se trouvent attirées davantage. Quand le courant décroît au contraire, l'attraction faiblit, elles s'écartent des noyaux, suivant ainsi toutes les fluctuations du courant et reproduisant par suite les vibrations sonores qui ont provoqué ces fluctuations.

Récepteur-montre. — Un type beaucoup employé, particulièrement dans les applications domestiques, est le *téléphone-montre,* ainsi appelé à cause de sa forme (fig. 278, 279).

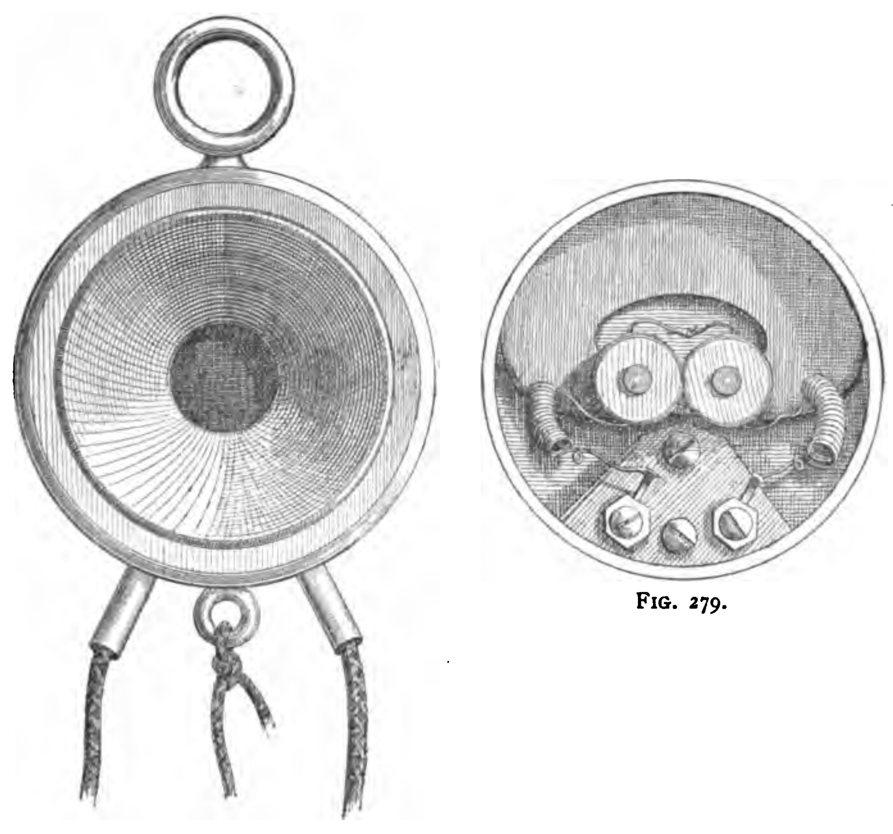


Fig. 279.

Fig. 278.

Il condense l'appareil sous un faible volume, par la mise à contribution d'un aimant plat, pourvu de noyaux en retour d'équerre, sur lesquels sont fixées les bobines, le tout contenu dans une cuvette métallique.

Téléphone serre-tête. — Si le récepteur doit rester fixé sur la tête, on le monte sur un ressort R (fig. 280) recourbé, en acier, terminé par un bourrelet S pour adoucir la pression.

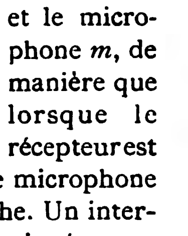


Fig. 280.

La résistance des téléphones est de 100 à 120 ohms.

Microtéléphone — Dans les postes mobiles, on combine souvent ensemble le téléphone R (fig. 281) et le microphone *m*, de manière que lorsque le récepteur est appuyé contre l'oreille, le microphone se trouve devant la bouche. Un interrupteur I, placé dans la poignée, permet d'admettre le courant dans le microphone au moment de l'utilisation.

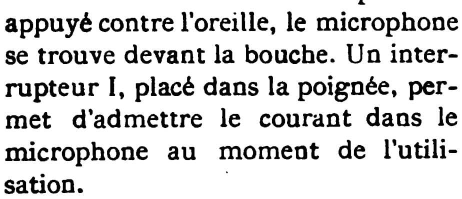




Fig. 281.

Appareils d'appel. — Sonnerie vibrante. — Le téléphone et le microphone ne suffisent pas pour constituer un poste téléphonique. Il faut encore des appareils d'appel, parmi lesquels la sonnerie vibrante étudiée précédemment joue un rôle important, surtout dans les postes domestiques.

Le circuit de la sonnerie vibrante doit comporter quelques éléments de pile (deux suffisent avec les bonnes sonneries) et un bouton d'appel simplement constitué par deux lames en laiton recourbées, et se faisant face, que l'on peut pousser en contact au moyen d'un bouton coulissant dans le couvercle.

Sonnerie électromagnétique. — Celle-ci fonctionne sous

l'influence de courants alternatifs. Sur une planchette AB (fig. 282) sont montés deux timbres T_1, T_2, dont les supports retiennent une traverse GH, sur laquelle est pivotée une armature en fer DF portant au bout d'une tige le battant C. Un aimant permanent II polarise l'armature et les noyaux, par exemple de la manière indiquée sur le schéma (fig. 283), en formant un pôle conséquent au milieu de l'armature. En supposant celle-ci à égale distance des deux noyaux, elle se trouve dans un état d'équilibre instable. Si, dès lors, on fait passer un courant alternatif dans les bobines EE supportées sur le chevalet JJ et raccordées aux bornes *bb*, pendant la demi-période positive, par exemple, il renforce le pôle N du noyau de gauche, et diminue d'autant sinon renverse le magnétisme du pôle nord du noyau de droite. L'équilibre est donc rompu et l'armature oscille de manière que le battant vienne frapper le timbre T_2. Au contraire, pendant la demi-période négative, le noyau de droite aura son aimantation

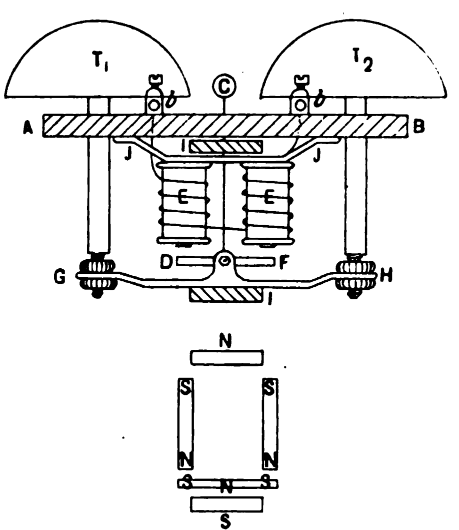


Fig. 282 et 283.


Fig. 284.

renforcée et celui de gauche son aimantation diminuée ou intervertie, de sorte que l'armature oscillera en sens inverse, le battant venant frapper le timbre T_1 et ainsi de suite. La figure 284 donne la vue extérieure de l'appareil.

MACHINE MAGNÉTO-ÉLECTRIQUE — Les courants alternatifs nécessaires pour la production des appels sont engendrés par la petite machine décrite page 219, figures 127 et 128, et montrée en élévation (fig. 285). A la vitesse de 15 tours par seconde les magnétos des abonnés développent 65 volts efficaces environ, en circuit ouvert.



FIG. 285.

Poste normal. — Le poste normal principalement utilisé en Belgique, comprend la magnéto M (fig. 286), la sonnerie électro-magnétique S, la fourche-commutatrice AB sollicitée vers le haut par le ressort R, les bornes L_1 et L_2 où s'attachent les fils de ligne et 3 ressorts de contact E, F, G, raccordés le premier à la sonnerie, le second à un circuit comprenant l'enroulement secondaire de la bobine d'induction et le ou les téléphones; le troisième au circuit primaire du microphone *m* et à la pile P.

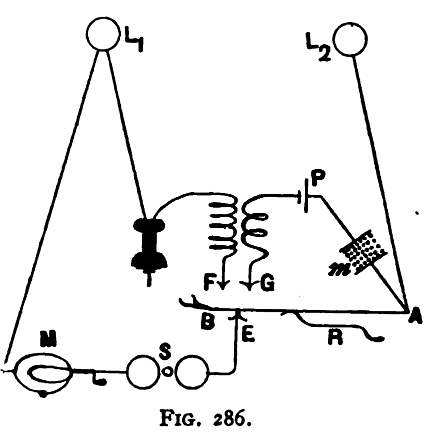


FIG. 286.

Dans la position d'attente, un des téléphones, engagé dans la fourche-commutatrice, la pousse à fond vers le bas, de manière qu'elle soit en contact avec le ressort E. Le circuit

comporte la borne L_1, la magnéto M normalement mise en court-circuit pour éliminer sa résistance, la sonnerie S, la paillette métallique E, la fourche AB, la borne L_2. Si des courants alternatifs sont transmis sur la ligne, ils traversent la sonnerie réceptrice qu'ils font fonctionner. De même si la magnéto est actionnée, son court-circuit se trouve rompu mécaniquement et des courants sont lancés sur la ligne à travers la sonnerie S. Quand on décroche le téléphone, la fourche se relève sous la poussée du ressort R, ce qui déconnecte le ressort E et applique la fourche sur les deux paillettes F et G. D'une part, le circuit primaire du microphone A*m*PG est fermé; d'autre part, les bornes L_1 et L_2 sont réunies par le téléphone T, l'enroulement secondaire de la bobine, la fourche AB. Le poste est donc en état de recevoir et de transmettre la parole.

La figure 287 donne la vue d'un poste à microphone et magnéto combinés.

Fig. 287.

Commutateurs. — Les principaux appareils de l'espèce sont ceux desservant les bureaux centraux téléphoniques où convergent les lignes d'abonnés, qu'il faut pouvoir réunir temporairement avec promptitude, pour permettre l'échange des communications.

Ils comportent tous des organes communs qui sont : les annonciateurs, les jacks, fiches, cordons, clés et boutons d'appel.

Annonciateurs. — *A*. D'ABONNÉS. — Les annonciateurs mis en relation avec les lignes d'abonnés sont analogues aux annonciateurs télégraphiques décrits précédemment. Leur résistance est d'environ 120 ohms.

B. DE FIN DE COMMUNICATION. — Ceux de fin de communication ne comportent généralement qu'un seul noyau. Leur résistance s'élève à 600 ohms et ils sont entourés d'une chemise tubulaire (fig. 288) pour leur donner un grand coefficient de selfinduction, qui réduit de beaucoup les courants dérivés qui les traversent.

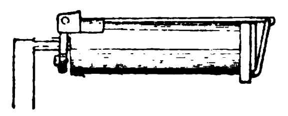


FIG. 288.

Jacks. — Les jacks sont des contacts mobiles que l'on peut disjoindre par l'insertion d'une fiche. A une partie

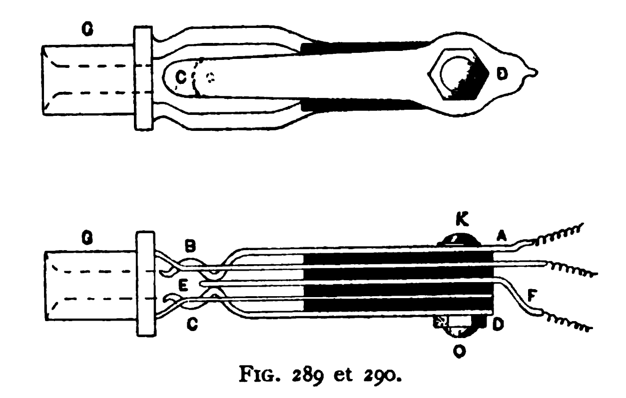


FIG. 289 et 290.

massive G (fig. 289, 290), perforée d'un trou cylindrique, se rattachent deux lames comprenant entre elles une lame EF qui en est isolée. Deux autres lames élastiques AB, CD, isolées des précédentes, viennent toucher EF à travers des évidements pratiqués dans les supports de G.

Fiches et cordons. — Les fiches s'introduisent dans les jacks pour effectuer certaines liaisons. Elles comportent (fig. 291) une tige centrale terminée par une sphère métal-

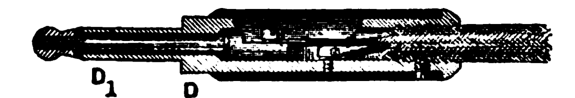


FIG. 291.

lique. Autour de cette tige se trouve un cylindre d'ébonite recouvert d'un autre cylindre métallique DD_1 pourvu d'un épaulement. La tige centrale et le cylindre extérieur sont raccordés aux conducteurs d'un cordon souple fixé à la fiche.

Quand celle-ci est introduite dans un jack, la partie extérieure D_1 engagée dans le trou cylindrique est en contact avec la partie massive G, tandis que la pointe sphérique écarte du ressort central EF les deux ressorts AB, CD, en restant en contact avec eux.

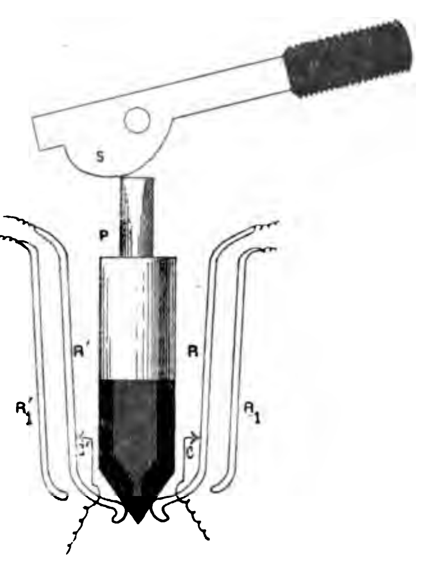


FIG. 292.

Clés et boutons d'appel. — Deux lames métalliques R et R′ (fig. 292) pourvues de rondelles platinées sont, dans la position de repos, en contact avec les pointes platinées C et C′. Quand on les écarte en actionnant une tige P pourvue d'un bloc isolant taillé en biseau, elles quittent les contacts C, C′ pour s'appliquer sur les lames R_1, R'_1. Lorsque les lames doivent rester dans cette position, le mouvement est commandé par un excentrique

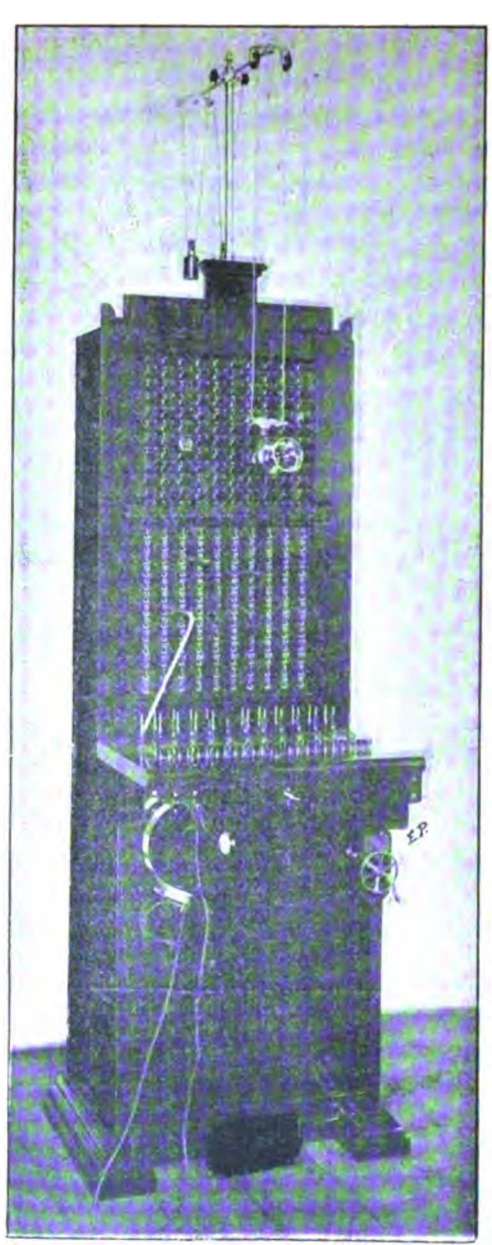


FIG. 293.

et l'on a affaire à une clé. Si le contact avec les lames extérieures ne doit être que passager, la tige P est coiffée d'une calotte isolante sur laquelle on exerce une pression et l'on a affaire à un bouton. Celui-ci revient à sa position de repos dès qu'on cesse de l'actionner.

Commutateur Standard. — Il est construit pour 50, 100, 110 et même 150 lignes et présente extérieurement la forme d'un piano-buffet (fig. 293).

Chaque circuit d'abonné se raccorde à un jack G et à un annonciateur V (fig. 294.) Ces annonciateurs et jacks s'alignent sur un panneau vertical du meuble.

Sur le panneau horizontal sont disposés les organes d'appel, de jonction et de conversation dont se sert l'opérateur. On trouve un nombre de paires de fiches avec

leur clés et boutons d'appel égal à 10 à 15 °/₀ du nombre des numéros de la table, un microphone et un téléphone qui, si le trafic est considérable, est du type serre-tête.

Les connexions d'une paire de fiches W_1 et W_2 (fig. 295) sont établies de la manière suivante : les fiches W_1, W_2, communiquent par les conducteurs de leurs cordons avec des boutons d'appel dont les lames *q* et *r* reposent sur des contacts reliés à une clé d'écoute H qui, dans la position de repos, les connecte avec le circuit du poste d'opérateur T et, dans sa position de travail, substitue au poste un annonciateur V_1 de fin de communication. En appuyant sur un des boutons, on coupe toute relation avec la clé et on met les deux conducteurs du cordon conjugué en rapport avec les deux pôles de la magnéto d'appel M.

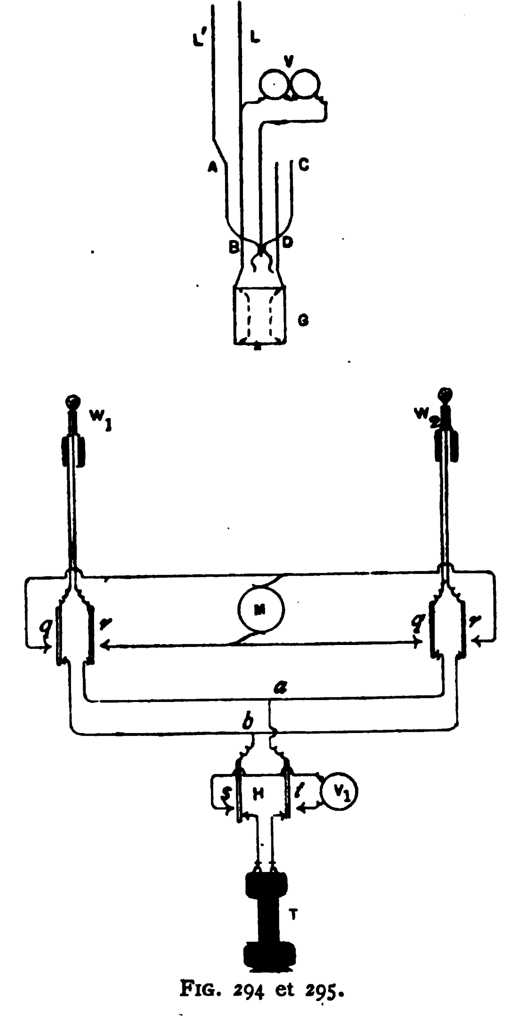


Fig. 294 et 295.

Fonctionnement de l'appareil. — Quand un abonné émet des signaux d'appel, le volet de son annonciateur déclenche,

démasquant le numéro qui lui est affecté. L'employé saisit une fiche, W_1 par exemple, et l'introduit dans le jack G. La pointe de la fiche écarte les ressorts de la lame centrale du jack, ce qui isole l'annonciateur; d'autre part, le contact est établi entre les deux conducteurs du cordon et les fils L et L', par l'intermédiaire du canon du jack (partie extérieure de la fiche) et les ressorts extérieurs (partie centrale de la fiche). La connexion est donc obtenue avec le poste téléphonique de l'opérateur, qui peut ainsi prendre connaissance de la communication demandée. Il enfonce alors la fiche conjuguée W_2 dans le jack G_n de l'abonné *n* demandé et pousse à fond le bouton conjugué en actionnant la magnéto M, ce qui envoie des courants d'appel chez ce dernier. Celui-ci vient à l'appareil, l'opérateur dit : « parlez » et fait basculer la clé d'écoute H de manière à intercaler l'annonciateur de fin de communication en dérivation sur les fils temporairement reliés. Quand la communication est terminée, les abonnés font effectuer quelques tours à la manivelle de leur magnéto, ce qui provoque le déclenchement du volet de l'annonciateur de fin de communication V_1, et l'employé, ainsi averti, enlève les fiches hors des jacks, rétablissant tout dans l'état primitif.

CHAPITRE XXI

EFFETS PHYSIOLOGIQUES DU COURANT. FACTEURS EN JEU. MESURES A PRENDRE EN CAS D'ACCIDENTS DE PERSONNES.

Effets produits. — Les effets produits sont de deux natures : ou bien il y a lésion sous l'action de la chaleur développée dans la résistance du ou des contacts existant entre le corps et le conducteur dangereux, et l'on a alors affaire à une brûlure plus ou moins grave ; ou bien le fonctionnement d'organes essentiels comme le cœur ou les poumons se trouve compromis, paralysé ou même complètement annihilé, et l'on constate la mort soit par arrêt de la circulation, soit par asphyxie. En particulier, quand les mains saisissent des conducteurs à potentiel suffisamment élevé, la contraction des muscles est telle qu'on ne peut plus les détacher, tant que les conducteurs sont actifs.

Facteurs en jeu. — Les conditions dans lesquelles se produisent les accidents sont extrêmement variables. Leur gravité est influencée non seulement par l'état, la constitution et les tares physiologiques des personnes atteintes, les endroits du corps touchés, le voltage, la nature et éventuellement la fréquence des courants, mais encore par l'état momentané de l'installation au point de vue de son bon isolement et de la position de ses défauts par rapport au point où se produit le contact.

Il est donc pour ainsi dire impossible d'établir des règles fixes. On sait cependant que les alcooliques, de même que les personnes atteintes de maladies du cœur, paraissent beaucoup plus sujettes que les autres à subir des accidents graves, et que le voltage est d'autant plus dangereux qu'il est plus élevé. Avec le courant continu, sauf dans le cas où

les yeux sont atteints, on n'a pas encore enregistré d'accidents graves pour des tensions de 110 à 120 volts.

Le courant alternatif est plus dangereux, à cause des excitations périodiques qu'il produit; 100 volts efficaces constituent la limite à partir de laquelle il y a danger.

La fréquence joue aussi un rôle qui, chose curieuse, peut s'intervertir. Par exemple, des courants de faible intensité et de fréquence élevée (10 000, par exemple), loin d'être nuisibles à l'organisme, peuvent lui être utiles. On les utilise en effet en électrothérapie.

Processus à suivre dans les accidents. — Les personnes frappées par des manifestations électriques industrielles ou naturelles (la foudre) doivent, d'une manière générale, être considérées comme asphyxiées. Pour agir efficacement, il faudra, en premier lieu, supprimer la cause de l'accident et appliquer immédiatement le traitement approprié, tout en requérant de suite l'aide d'un médecin.

Suppression de la cause. — *A*. PAR ÉLOIGNEMENT. — Il faut écarter le patient des conducteurs électriques et, pour éviter de recevoir soi-même des commotions dangereuses, mettre des gants en caoutchouc, s'envelopper les mains plusieurs fois avec des vêtements (de préférence en laine), couverture, ceinture de flanelle ; employer, pour éloigner les conducteurs, une canne ou un bâton de bois sec; saisir la victime par les vêtements; s'isoler soi-même du sol en se plaçant sur des tapis, vêtements, planches sèches et, en tous cas, éviter soigneusement de toucher simultanément deux conducteurs.

Si la victime est suspendue, il faut naturellement prendre des mesures pour atténuer la chute, en amortissant celle-ci par des matelas, bottes de paille, etc, ou en faisant usage de cordes.

B. PAR EXTINCTION DU COURANT. — S'il n'est pas possible d'arriver à un résultat net ou rapide de cette manière, il y aura lien de faire suspendre l'action du courant en demandant immédiatement à l'usine d'arrêter les machines, ou en manœuvrant les interrupteurs commandant le circuit, siège

de l'accident. Si l'application de ces mesures est trop longue ou présente des difficultés spéciales, les personnes du métier devront chercher à mettre en court-circuit les conducteurs au moyen d'une chaîne ou d'un fil métallique, pour faire sauter les fusibles de la centrale, ou couper les fils avec une hache à manche de bois sec. Ces deux opérations se feront avec beaucoup de précaution et seulement par des personnes absolument compétentes.

Soins à donner. — On transporte la victime dans un local aéré et on congédie tous ceux dont la présence n'est pas nécessaire. On enlève les habits couvrant le haut de son corps,



FIG. 296 et 297.

on dégrafe ou déboutonne tout ce qui peut la serrer; un rouleau qui servira de coussin, à défaut de mieux, est fait avec les habits enlevés.

A. LA VICTIME RESPIRE ENCORE. — Le rouleau d'habits est

placé sous la tête de manière que celle-ci soit légèrement inclinée, et l'on applique sur le front des compresses d'eau froide ou de glace.

B. LA VICTIME NE RESPIRE PLUS. — Le rouleau d'habits est placé sous ses épaules. On lui ouvre la bouche, de force au besoin, par exemple avec un morceau de bois; on sort la langue et l'attache sur le menton. Puis, s'agenouillant derrière sa tête, on saisit les avant-bras près des coudes et les presse fortement sur la poitrine (fig. 297). Par cette opération, l'air se trouvant dans les poumons est expulsé. On reste dans cette position pendant quelques secondes, puis on tire les bras à soi en les allongeant au-dessus de la tête du patient (fig. 296), ce qui distend la poitrine et fait rentrer l'air dans les poumons. Cette position est maintenue deux secondes pour revenir à la position première et ainsi de suite quinze à vingt fois par minute.

L'opération doit être continuée d'une manière régulière, jusqu'à ce que la victime commence à respirer seule. En l'absence de résultats, on ne devra s'arrêter qu'après deux heures au moins.

Pour augmenter l'efficacité du traitement, une seconde personne peut pratiquer la traction rythmée de la langue, ce qui se fait en même temps que la respiration artificielle, en tirant la langue lorsque les bras sont allongés et la faisant rentrer au moment de la compression.

Quand la victime a repris connaissance, on lui administre un stimulant chaud : grog, thé, café, au moyen d'une petite cuillère.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE II. — **Groupement des générateurs d'électricité; puissance et rendement.**

CHAPITRE III. — **Piles thermo-électriques.**

CHAPITRE IV. — **Électrolyse.**

CHAPITRE V. — **Piles hydro-électriques.**

CHAPITRE VI. — **Les dynamos.**

CHAPITRE VII. — **Électromoteurs.**

CHAPITRE VIII. — **Couplage et essais des dynamos.**

CHAPITRE IX. — **Les accumulateurs.**

CHAPITRE XIV. — **Les canalisations électriques.**

CHAPITRE XV. — **Transport de l'énergie.**

CHAPITRE XIX. — **Télégraphie**.

CHAPITRE XX. — **Téléphonie.**

CHAPITRE XXI. — **Effets physiologiques du courant. Facteurs en jeu. Mesures à prendre en cas d'accidents de personnes.**

ERRATA

Page 19, note, *au lieu de* 1901, *lire* 1900.

— 36, troisième ligne, au dénominateur, *au lieu de* 10^5, *lire* 10^4.

— 64, ligne 14, *au lieu de* polarisation, *lire* dépolarisation.

— 121, — 6 du bas, *au lieu de* fig. 40, 42 et 44, *lire* fig. 58, 60 et 62.

— 213, — 5, *au lieu de* au, *il faut* en.

— 238, — 2, *au lieu de* ABC, *lire* ABD.

— 244, — 15, avant ω, *il faut* de.

— 254, formule, ligne 3, premier dénominateur, *au lieu de* ω^{1}_{2}, *il faut* ω^{2}_{1}.

— 268, ligne 3, après conclusions, *remplacez les trois lignes suivantes par :* Les noyaux des bobines sont réunis haut et bas par des culasses sièges de flux polyphasés affectant le montage en polygone. La première culasse étant traversée par un flux alternatif $\mathcal{N} \sin \omega t$, la précédente portera le flux $\mathcal{N} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{n}\right)$ et la suivante le flux $\mathcal{N} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{n}\right)$. La différence, etc...

— 268, ligne 9, *permutez les mots* culasses *et* noyaux.

— 268, dernière ligne, *remplacez* $\sqrt{3}\,S$, *par* $\frac{S}{\sqrt{3}}$.

— 275, ligne 5, *au lieu de* n, *il faut* $2n$.

— 299, — 7 du bas, *au lieu de* consirable, *lire* considérable.

— 303, — 7 du bas, *au lieu de* $i_m = 2{,}34$ à $3{,}41$ fois le courant maximum, *lire :* le courant maximum $= 2{,}34$ à $3{,}41$ fois le courant moyen déterminé comme ci-dessus.

— 314, ligne 8, *au lieu de* ou, *lire* au.

— 333, — 7, *au lieu de* résistance, *lire* résistivité ; *au lieu de* exprimé, *lire* exprimée.

— 342, ligne 4 du bas, *au lieu de* le manœuvre, *il faut* la manœuvre.

